



TUGAS AKHIR - MO141326

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *FREE SPAN* YANG TERJADI
PADA *EXPORT PIPELINE* SAAT KONDISI OPERASI

FAUZAN ADHITYA PRATAMA
NRP. 04311440000068

Dosen Pembimbing :
Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



FINAL PROJECT - MO141326

FATIGUE LIFE ANALYSIS CAUSED BY FREE SPAN ON EXPORT
PIPELINE DURING OPERATION CONDITION

FAUZAN ADHITYA PRATAMA
NRP. 04311440000068

Supervisors :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *FREE SPAN* YANG TERJADI PADA *EXPORT PIPELINE* SAAT KONDISI OPERASI

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Progran Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi

Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FAUZAN ADHITYA PRATAMA

NRP. 04311440000068

Disetujui oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing 1)

2. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

(Pembimbing 2)

3. Dr. Eng., Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Penguji 1)

SURABAYA, JULI 2018

**ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *FREE SPAN* YANG TERJADI
PADA *EXPORT PIPELINE* SAAT KONDISI OPERASI**

Nama : Fauzan Adhitya Pratama
NRP : 04311440000068
Departemen : Teknik Kelautan FTK - ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.,
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRAK

Salah satu bagian penting dalam sebuah pengoperasian sistem pipa bawah laut adalah mempertimbangkan terjadinya *free span* pada pipa bawah laut. Analisis *free span* dilakukan untuk mengetahui keadaan pipa dalam keadaan beroperasi yang tentunya rentan akan terjadinya kegagalan seperti kelelahan. Salah satu penyebab kelelahan yaitu disebabkan oleh vibrasi yang terjadi oleh *vortex shedding* atau biasa disebut *vortex induced vibration* (VIV). Dalam tugas akhir ini bentangan bebas pipa yang tidak memenuhi kriteria *screening fatigue* menurut DNV RP F105 sebanyak 4 bentangan dari 15 yang ditinjau di dalam tugas akhir. Nilai tegangan ekuivalen (*Von Mises*) yang diperoleh pada setiap *span* yang ditinjau hasil *screening criteria fatigue* berada pada rentang 206,47 MPa – 218,80 MPa. Untuk nilai tegangan ekuivalen terbesar, terjadi pada *span* dengan panjang aktual 7 m dan *gap* 1 m sebesar 218,80 MPa dengan rasio 0,54 terhadap *Allowable stress* ASME B3.18. Dan nilai tegangan ekuivalen terkecil terjadi pada *span* dengan panjang aktual 24 m dan *gap* 0,2 sebesar 206,47 MPa dengan rasio 0,51 terhadap *Allowable stress* ASME B3.18. Berdasarkan *fatigue analysis* yang telah dilakukan, jika dibandingkan dengan *design life*, maka 11 bentangan yang dianalisis masih dikatakan aman untuk beroperasi karena memiliki nilai *fatigue life* diatas *design life*. Dan nilai *fatigue life* terkecil sebesar 41 tahun ada pada *span* 24 m dengan *gap* 0,24 untuk arah *In-line*.

Kata Kunci : *Subsea pipeline, Allowable span, free span, in-line, cross-flow, VIV, umur kelelahan*

FATIGUE LIFE ANALYSIS CAUSED BY FREE SPAN ON EXPORT PIPELINE DURING OPERATION CONDITION

Name : Fauzan Adhitya Pratama
NRP : 04311440000068
Department : Ocean Engineering FTK - ITS
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc..
Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.

ABSTRACT

An important aspect of operating an underwater pipeline system is considering the effects of free span on the underwater pipeline. Free span analysis is done to identify the behavior of the pipe in operating condition where it is susceptible to fatigue failure. One of the causes of fatigue failure is the vibration of the pipe caused by vortex shedding or commonly known as vortex induced vibration (VIV). In this research, the free span of the pipe does not fulfil the screening fatigue criteria according to DNV RP F105. 4 free spans from 15 are reviewed in this research. The equivalent stress (*Von Mises*) obtained at every free span is at the range of 206,47 MPa – 218,80 Mpa is then subject to the fatigue screening criteria. The largest equivalent stress occurs at the span with actual length of 7m and gap 1m with a stress of 218,80 MPA, resulting in an ASME B3.18 allowable stress ratio of 0,54. The smallest equivalent stress occurs at free span with actual length of 24 m and gap 0,2 with a stress of 206,47 MPA, resulting in an ASME B3.18 allowable stress ratio of 0.51. Based on the fatigue analysis, when compared to design life, the 11 free spans reviewed are still considered safe to operate as it has a higher fatigue life than design life. The smallest fatigue life is at 41 years at the pipeline with *span* of 24 m and *gap* 0,24 for *In-line* condition.

Keywords : *Subsea pipeline, Allowable span, free span, in-line, cross-flow, VIV, fatigue life*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia – Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta laporannya dengan baik dan tepat waktu. Laporan ini berisi tentang tahapan proses dan hasil dari tugas akhir penulis. Tugas Akhir ini berjudul “**ANALISIS UMUR KELELAHAN AKIBAT *FREE SPAN* YANG TERJADI PADA *EXPORT PIPELINE* SAAT KONDISI OPERASI.**”

Tugas akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Program Sarjana (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Tugas Akhir ini mengangkat permasalahan tentang pengaruh *vortex induced vibration* (VIV) dan panjang *free span* terhadap umur kelelahan pipa bawah laut dalam keadaan operasi, guna mengetahui panjang *span* maksimumnya serta sisa umur kelelahan bentangan pipa tersebut.

Penulis menyadari bahwa di dalam proses penyelesaian tugas akhir dan penulisan laporan ini masih terdapat kekurangan, baik dari pemilihan batasan masalah, pemilihan parameter, dan dari sis penulisan. Kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan oleh penulis, agar menjadi evaluasi guna menghasilkan suatu penelitian dan penulisan yang lebih baik ke depannya. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat untuk perkembangan teknologi kemaritiman terutama pada bidang *pipeline* untuk pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2018

Fauzan Adhitya Pratama

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam bagian ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang turut membantu kelancaran selama pengerjaan tugas akhir ini. Mungkin ucapan ini tidak sebanding dengan apa yang diberikan oleh pihak – pihak tersebut, namun diharapkan dapat menjadi sebuah pembelajaran untuk penulis agar senantiasa berterima kasih kepada pihak yang telah memberikan banyak bantuan dalam tugas akhir ini. Beberapa pihak tersebut diantaranya:

1. Allah SWT, karena atas berkat, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Orang tua terbaik dan luar biasa yang pernah ada, Ayahanda, Asep Kartiyana. Dan Ibunda, Mardiah Asya. Terima kasih atas segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah diberikan selama ini. Maafkan anakmu yang belum bisa memenuhi ekspektasi kalian untuk menjadi yang terbaik serta membanggakan, percayalah saya telah berusaha semaksimal mungkin untuk melakukan itu.
3. Adik yang sangat saya banggakan, Ananda Muhammad Naufal Athala, untuk apa yang telah diberikan selama ini. Terima kasih atas dukungan dan telah menjadi motivasi saya selain Ibu dan Ayah. Maafkan saya belum bisa menjadi kakak yang terbaik, percayalah saya senantiasa berusaha.
4. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc. dan Bapak Nur Syahroni, ST., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini, atas bantuan masukan, dukungan dan ilmu bermanfaat dalam mengerjakan dan menyusun Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen, Karyawan, Tim tata usaha dan Administrasi Departemen Teknik Kelautan FTK ITS, yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada penulis selama menjalani perkuliahan dan menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Dr. Ir., Wahyudi, M.Sc. selaku dosen wali saya yang telah membantu dan mengarahkan selama saya berkuliah di Teknik Kelautan.
7. Bapak Fitra Wahyudi dan Om Rheza selaku orang – orang yang telah menyediakan data – data tugas akhir, memberikan motivasi dan bimbingan serta senantiasa mendoakan dari awal hingga akhir.

8. Mas Nurman Firdaus (2009), Mas M. Auliya Aldi (2012), yang telah membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini, terkhusus dalam pemahaman teori dan permodelan. Juga terima kasih untuk teman – teman satu bimbingan (Keluarga Makmum & Keluarga Syahroni) seperjuanganku, yang telah menjadi teman *sharing* dalam pengerjaan tugas akhir ini.
9. Teman – Teman saya yang tergabung dalam keluarga Anti Wibu, No Hard Feeling, Cengengesan, Biji Kopi, SAFARY Bogor dan lainnya, atas segala kegiatan di dalam dan di luar kampus, atas segala ilmu yang tidak didapatkan di dalam perkuliahan, dan atas segala kehadirannya ketika saya sudah lelah dengan berkuliah di Surabaya.
10. Keluarga besar angkatan MAELSTROM P-54 L-32, yang selalu mendukung penulis hingga selesainya tugas akhir ini. Terima kasih telah menjadi keluarga baru dari awal kehadiran penulis di Surabaya.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah turut berperan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	I
LEMBAR PENGESAHAN	III
ABSTRAK	IV
ABSTRACT	V
KATA PENGANTAR	VI
UCAPAN TERIMA KASIH.....	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR.....	XIV
DAFTAR TABEL	XV
DAFTAR NOTASI.....	XVIII
DAFTAR LAMPIRAN.....	XXI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
2.2 Dasar Teori.....	9
2.2.1 Kondisi Pembebanan Pipa	9
2.2.2 Bentangan Bebas (<i>Freespan</i>).....	9
2.2.3 Dimensi Pipa.....	11
2.2.4 Massa Efektif Pipa	13
2.2.5 Berat Terendam Pipa.....	14
2.2.6 Beban Lingkungan	15

2.2.6.1	Gelombang	15
2.2.6.2	Arus	18
2.2.7	Kriteria Aliran	19
2.2.8	Gaya Hidrodinamis	21
2.2.8.1	Gaya Drag	21
2.2.8.2	Gaya Inersia	23
2.2.8.3	Gaya Lift	24
2.2.9	<i>Vortex Induced Vibration (VIV)</i>	24
2.2.9.1	Frekuensi Vortex Shedding (f_s)	25
2.2.9.2	Reynold Number	25
2.2.9.3	Stability Parameter	26
2.2.9.4	Reduced Velocity	26
2.2.9.5	Current Flow Ratio	27
2.2.9.6	Keluegan Carpenter Number (KC)	27
2.2.10	Safety Factor	27
2.2.11	<i>Dynamic Soil Stiffness</i>	27
2.2.11.1	Koefisien Dynamic Soil Stiffness	28
2.2.11.2	Poisson Ratio Tanah	29
2.2.12	Frekuensi Natural Pipa	29
2.2.12.1	Effective Axial Force	30
2.2.12.2	Critical Buckling Load	31
2.2.12.3	Static Deflection	31
2.2.12.4	Concrete Stiffness Factor (CSF)	31
2.2.12.5	Boundary Condition	32
2.2.12.6	Panjang Bentangan Bebas Efektif	33

2.2.13 <i>Screening</i> Kriteria <i>Fatigue</i>	34
2.2.14 Tegangan Pada Pipa	35
2.2.14.1 Tegangan Hoop	36
2.2.14.2 Tegangan Longitudinal	36
2.2.14.3 Tegangan Ekuivalen (Von Mises)	37
2.2.15 Perkiraan Umur Kelelahan Pipa.....	38
2.2.15.1 Penentuan Nilai Siklus Kelelahan dengan Pendekatan Palmgreen-Miner Rule.....	39
2.2.15.2 Perkiraan Sisa Waktu Operasi Pipa.....	43
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	45
3.1 Metodologi Penelitian	45
3.1.1 Diagram Alir (<i>Flowchart</i>)	45
3.2 Prosedur Penelitian	48
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Analisis Data	53
4.1.1 Data Desain.....	54
4.1.2 Data Lingkungan.....	55
4.1.3 Data <i>Span</i> Aktual	56
4.2 Analisis Dimensi Pipa.....	57
4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa	57
4.2.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa.....	58
4.2.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa	60
4.3 Analisis Kecepatan Partikel Air	60
4.3.1 Perhitungan Kecepatan Arus <i>Steady</i> pada Elevasi Pipa.....	60
4.3.2 Perhitungan Kecepatan Arus akibat Gelombang pada Elevasi Pipa.....	61
4.4 Analisis Vortex Induced Vibration (VIV).....	64

4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis.....	67
4.5.1 Perhitungan Gaya <i>Drag</i>	68
4.5.2 Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	70
4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total.....	72
4.6 Analisis <i>Freespan</i>	73
4.6.1 Penentuan <i>Boundary Condition</i>	73
4.6.2 Analisis Panjang Span Efektif	74
4.6.3 <i>Effective Axial Force</i>	75
4.6.4 <i>Critical Buckling Load</i>	76
4.6.5 <i>Static Delflection</i>	78
4.6.6 Frekuensi Natural Pipa	80
4.7 <i>Screening</i> Kriteria <i>Fatigue</i>	83
4.8 Analisis Tegangan Pada Bentangan Bebas Hasil <i>Screening</i>	86
4.9 Analisis Sisa Umur Kelelahan Bentangan Bebas Pipa	88
4.9.1 <i>Unit Stress Amplitude</i>	89
4.9.2 <i>Stress Range</i>	90
4.9.3 Analisis Siklus <i>Stress</i> Pada Bentangan Bebas Pipa	92
4.9.4 Akumulasi <i>Fatigue Damage</i> dan <i>Fatigue Life</i>	92
4.10 Permodelan Menggunakan ANSYS CFX & <i>Static Structural</i>	95
4.10.1 ANSYS CFX.....	96
4.10.2 Permodelan Model ANSYS CFX	96
4.10.3 Hasil Permodelan ANSYS CFX	99
4.10.4 ANSYS <i>Static Structural</i>	99
4.10.5 Penggambaran Model ANSYS <i>Static Structural</i>	99
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	103

5.1 Kesimpulan.....	103
5.2 Saran.....	103
DAFTAR PUSTAKA	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jaringan Pipa Bawah Laut (<i>Soegiono, 2007</i>)	7
Gambar 2. 2 Tipe Umum <i>Free Span</i> Pipa Bawah Laut (<i>Pratama,2007</i>)	10
Gambar 2. 3 Gambar <i>Reduction Factor</i> Akibat Efek Arah & Seburan Gelombang	18
Gambar 2. 4 <i>Vortex Induced Vibration</i>	25
Gambar 2. 5 Respon Amplitudo <i>In-line VIV</i> , V_R , K_{sd}	41
Gambar 2. 6 Respon Amplitudo <i>Cross-Flow VIV</i> , V_R , K_{sd}	42
Gambar 2. 7 <i>Plotting Stress S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> (DNV RP C203,.....	43
Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir	45
Gambar 4. 1 Lokasi <i>Field</i> Terang Sirasum Batur.....	53
Gambar 4. 2 Lokasi 18” <i>Export Pipeline</i>	53
Gambar 4. 3 Permodelan Geometri dari <i>Free Span</i> yang Ditinjau	96
Gambar 4. 4 Aliran <i>Inlet</i> (sisi kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geometri..	97
Gambar 4. 5 Aliran <i>Outlet</i> (Kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geometri	97
Gambar 4. 6 Visualisasi <i>Meshing</i> Geometri <i>Free Span</i> yang Ditinjau.....	98
Gambar 4. 7 Pemberian <i>Boundary Condition</i> pada Model.....	98
Gambar 4. 8 Hasil Permodelan ANSYS CFX pada Model <i>Free Span</i>	99
Gambar 4. 9 Distribusi Pembebanan dengan beban kombinasi	101
Gambar 4. 10 Hasil tegangan <i>von-mises</i> dengan <i>software</i>	101

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Seabed Roughness Parameter</i>	19
Tabel 2. 2 Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran Arus	20
Tabel 2. 3 Kekasaran Permukaan Pipa	22
Tabel 2. 4 <i>Safety Factor</i> untuk <i>Screening Criteria</i>	27
Tabel 2. 5 <i>Safety Factor</i> untuk Parameter VIV	27
Tabel 2. 6 Koefisien <i>Dynamic Soil Stiffness</i> untuk Tanah Jenis Pasir	29
Tabel 2. 7 Parameter Geoteknik untuk Jenis Tanah Pasir	29
Tabel 2. 8 <i>Boundary Condition Coefficient</i>	33
Tabel 2. 9 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8	36
Tabel 2. 10 Tabel <i>S-N Curve</i> di <i>Seawater</i> dengan <i>Cathodic Protection</i>	42
Tabel 2. 11 <i>Allowable Damage Ratio for Fatigue</i>	44
Tabel 4. 1 Data Desain Pipa	54
Tabel 4. 2 Data Anti <i>Corrosion Coating</i>	55
Tabel 4. 3 Data <i>Concrete Coating</i>	55
Tabel 4. 4 Data Arus & Gelombang	55
Tabel 4. 5 Data Karakteristik Tanah	56
Tabel 4. 6 Data <i>Span</i> Aktual Hasil <i>Survey</i>	56
Tabel 4. 7 Perhitungan Dimensi Pipa	57
Tabel 4. 8 Massa Pipa di Udara	58
Tabel 4. 9 Perhitungan Massa Efektif	59
Tabel 4. 10 Perhitungan Berat Terendam Pipa	60
Tabel 4. 11 Perhitungan Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa	61
Tabel 4. 12 Data Gelombang	62
Tabel 4. 13 Parameter Spektrum JONSWAP	62
Tabel 4. 14 Hasil Angka Gelombang	63
Tabel 4. 15 Hasil Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa	64
Tabel 4. 16 Parameter Awal untuk Perhitungan Parameter VIV	64
Tabel 4. 17 <i>Modal Damping Ratio</i>	65
Tabel 4. 18 Nilai Parameter VIV	66
Tabel 4. 19 <i>In-line & Cross-Flow Reduced Velocity</i>	67

Tabel 4. 20 Parameter Awal Perhitungan Koefisien <i>Drag</i>	68
Tabel 4. 21 Hasil Koefisien <i>Drag</i>	68
Tabel 4. 22 Hasil Gaya <i>Drag</i>	69
Tabel 4. 23 Parameter Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	70
Tabel 4. 24 Perhitungan Gaya <i>Lift</i>	71
Tabel 4. 25 Perhitungan Gaya Hidrodinamis.....	72
Tabel 4. 26 Koefisien <i>Boundary Condition</i>	73
Tabel 4. 27 Parameter perhitungan Panjang Span Efektif.....	74
Tabel 4. 28 Panjang <i>Span</i> Efektif untuk Arah <i>In-Line & Cross-Flow</i>	75
Tabel 4. 29 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan	75
Tabel 4. 30 Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>	76
Tabel 4. 31 Parameter Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>	77
Tabel 4. 32 Nilai <i>Critical Buckling Load</i> Untuk Arah <i>In-line</i> dan <i>Cross-flow</i>	77
Tabel 4. 33 Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>	78
Tabel 4. 34 <i>Static Deflection</i> Arah <i>In-Line</i>	78
Tabel 4. 35 <i>Static Deflection</i> Arah <i>Cross-Flow</i>	80
Tabel 4. 36 Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>	81
Tabel 4. 37 Nilai Frekuensi Natural Arah <i>In-Line</i>	81
Tabel 4. 38 Nilai Frekuensi Natural Arah <i>Cross-Flow</i>	82
Tabel 4. 39 Parameter <i>Screening</i> Arah <i>In-Line</i>	84
Tabel 4. 40 Parameter <i>Screening</i> Arah <i>Cross-Flow</i>	84
Tabel 4. 41 Hasil <i>Screening</i> arah <i>In-Lin</i>	84
Tabel 4. 42 Hasil <i>Screening</i> arah <i>Cross-Flow</i>	85
Tabel 4. 43 Cek Hasil <i>Hoop Stress</i> dengan ASME B31.8.....	86
Tabel 4. 44 Validasi <i>Longitudinal Stress</i> dengan ASME B31.8.....	87
Tabel 4. 45 Validasi <i>Von Mises Stress</i> dengan ASME B31.8.....	88
Tabel 4. 46 Perhitungan <i>Unit Stress Amplitude</i>	89
Tabel 4. 47 Nilai <i>Unit Stress Amplitude In-Line & Cross-Flow</i>	89
Tabel 4. 48 <i>Stress Range</i> untuk Arah <i>In-line</i>	90
Tabel 4. 49 <i>Stress Range</i> untuk Arah <i>Cross Flow</i>	91
Tabel 4. 50 <i>Fatigue Life</i> Arah <i>In-line</i>	93
Tabel 4. 51 <i>Fatigue Life</i> Arah <i>Cross-flow</i>	94

Tabel 4. 52 Input Pembebanan pada ANSYS	100
---	-----

DAFTAR NOTASI

$\frac{A_y}{D_{tot}}$: <i>Normalised inline VIV amplitude</i>
A_{conc}	: Luas permukaan pipa <i>concrete</i> (m ²)
A_i	: Luasan internal pipa (m ²)
A_{CF}	: <i>Unit stress amplitude crossflow</i>
A_{IL}	: <i>Unit stress amplitude inline</i>
A_{st}	: Luas permukaan pipa baja (m ²)
C_{1-6}	: Konstata tumpuan
CSF	: <i>Concrete stiffness factor</i>
d	: Kedalaman laut (m)
D_{fat}	: <i>Accumulated fatigue damage</i>
D_{tot}	: Diameter total pipa (m)
E_{conc}	: <i>Modulus young concrete</i> (Mpa)
E_{pipa}	: <i>Modulus young pipa</i> (Mpa)
f_n	: Frekuensi <i>natural</i> (Hz)
f_s	: Frekuensi <i>vortex shedding</i> (Hz)
g	: Gaya gravitasi (m/s ²)
H	: Tinggi gelombang (m)
I_{conc}	: Momen inersia <i>concrete</i> (m ⁴)
ID	: Internal diameter (m)
I_{pipa}	: Momen inersia pipa (m ⁴)
k	: Angka gelombang
K	: Kekakuan tanah
K_s	: Parameter kestabilan
L	: Panjang gelombang pada kedalaman yang ditinjau (m)
L_s	: Panjang <i>span</i> aktual (m)
L_{eff}	: Panjang <i>span</i> efektif (m)
L_{st}	: Panjang maksimum <i>span</i> (m)
M	: Momen (N.m)
M_{cc}	: Massa pipa lapisan anti korosi / <i>coating</i> (Kg/m)
M_{add}	: Massa tambah pipa (Kg/m)

M_{conc}	: Massa pipa lapisan <i>concrete</i> (Kg/m)
M_{eff}	: Massa efektif pipa (Kg/m)
M_f	: Massa fluida (Kg/m)
M_p	: Massa pipa baja (Kg/m)
N	: <i>Number cycles to failure at stress range</i> (cycles)
n	: <i>Total number of stress cycles corresponding to the stress range</i> (cycles)
D_0	: Diameter luar pipa baja (m)
T	: Periode gelombang (s)
P_{cr}	: <i>critical buckling load</i> (N/m)
P_e	: Tekanan <i>eksternal</i> pipa (Pa)
P_i	: Tekanan <i>internal</i> pipa (Pa)
Re	: <i>Reynold number</i>
s	: jarak vertikal titik yang ditinjau dari dasar laut (m)
S_i	: <i>stress range</i> (Mpa)
SMYS	: <i>specified minimum yield stress</i> (Mpa)
T_{cc}	: tebal pipa <i>coating</i> (m)
t_{conc}	: tebal pipa <i>concrete</i> (m)
T_{life}	: sisa waktu operasi
t_{st}	: tebal pipa baja (m)
t_{tot}	: tebal total pipa (m)
U_c	: Kecepatan arus efektif (m/s)
U_D	: Kecepatan arus pada ketinggian perairan yang ditinjau (m/s)
U_o	: Kecepatan gelombang pada ketinggian perairan yang ditinjau (m/s)
U_w	: Kecepatan gelombang efektif (m/s)
ν_k	: <i>kinematic viscosity of fluid</i>
V_R	: <i>Reduced velocity</i>
y	: Jarak vertikal suatu titik yang ditinjau terhadap muka air (m)
z	: Ketinggian di atas <i>seabed</i> hingga letak pipa
z_o	: Parameter kekasaran <i>seabed</i>
z_r	: Ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga tempat perletakan pipa
η	: <i>safety factor</i>

ν : *Poisson's ratio*
 σ_{axl} : *tegangan aksial (Mpa)*
 $\sigma_{bending}$: *tegangan bending (Mpa)*
 σ_L : *Longitudinal stress (Mpa)*
 $\psi_{\alpha,LL}$: *correction factor current flow ratio*
 γ_s : *safety factor to be multiplied to the stress range*
 δ_s : *Logaritmic decrement*
 ρ_{ac} : *density coating, kg/m³*
 ρ_{cc} : *density concrete, kg/m³*
 ρ_{st} : *density baja, kg/m³*
 ρ_{sw} : *density air laut, kg/m³*
 σ_h : *hoop stress (Mpa)*
 σ_V : *von mises stress*
 δ : *Defleksi pipa (m)*

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	PERHITUNGAN DIMENSI, MASSA EFEKTIF, & BERAT TERENDAM
LAMPIRAN B	PERHITUNGAN KECEPATAN PARTIKEL AIR (ARUS & GELOMBANG)
LAMPIRAN C	PERHITUNGAN GAYA HIDRODINAMIS
LAMPIRAN D	PERHITUNGAN <i>DYNAMIC SOIL STIFFNESS</i> DAN <i>CONCRETE STIFFNESS FACTOR</i>
LAMPIRAN E	PERHITUNGAN FREKUENSI NATURAL PIPA
LAMPIRAN F	<i>SCREENING</i> KRITERIA <i>FATIGUE</i> DAN <i>FATIGUE LIFE</i>
LAMPIRAN G	<i>OUTPUT</i> ANSYS <i>STATIC STRUCTURAL</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan terhadap energi seperti minyak dan gas bumi semakin meningkat. Sementara itu cadangan minyak dan gas alam semakin menipis terutama di *onshore* maupun perairan dangkal. Hal ini memaksa industri lepas pantai untuk melakukan eksplorasi dan eksploitasi di wilayah perairan yang lebih dalam dan jauh dari daratan. Dengan adanya kebijakan diatas maka diperlukan sistem transportasi produksi minyak dan gas alam yang handal, salah satunya adalah dengan sistem transportasi menggunakan pipa bawah laut (*subsea pipeline*).

Pipa bawah laut sendiri pertama kali digunakan di Summerland, California. Yaitu ketika pertama kali proses produksi minyak bumi dilakukan di lepas pantai pada tahun 1897 (Leffler et al., 2003 dalam Guo et al., 2005). Sejak itu pipa bawah laut telah menjadi sarana yang dianggap efisien mengangkut fluida di lepas pantai, seperti, minyak dan gas. Pipa bawah laut dapat bekerja 24 jam sehari, 365 hari dalam setahun selama umur pipa yang bisa mencapai 30 tahun atau bahkan lebih (Soegiono, 2007). Namun, karena medan yang dilalui oleh pipa sangat beragam, maka dalam pengoperasiannya akan banyak ditemukan berbagai macam persoalan, baik persoalan kelelahan (*fatigue*), korosi (*corrosion*), maupun retak (*crack*). Fenomena yang perlu diperhatikan pada pipa bawah laut akibat adanya beban-beban tersebut adalah terjadinya getaran pada pipa bawah laut. Dan yang lebih ekstrim lagi adalah timbulnya kelelahan yang dapat menyebabkan keretakan pada bagian pipa bawah laut.

Salah satu penyebab dari kelelahan pada pipa bawah laut adalah bentangan bebas (*free span*). Menurut bai dan bai (2014), bentangan bebas merupakan bagian pipa bawah laut yang tidak didukung oleh tanah. Faktor yang menyebabkan bentangan bebas pada pipa bawah laut diantaranya adalah permukaan dasar laut yang tidak rata, *crossing*

pipeline, perubahan topologi dasar laut akibat penggerusan tanah (*scouring*).

Free span yang terjadi akan mengalami vibrasi akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada daerah tersebut atau biasa disebut fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Fenomena VIV terjadi akibat terbentuknya *vortex* di belakang pipa yang membelakangi arah aliran arus yang membentur pipa sehingga berdampak pada tekanan di area belakang pipa menjadi lebih kecil dibandingkan di area depan pipa sehingga menyebabkan terjadinya vibrasi. Vibrasi yang terbentuk ini akan menyebabkan terjadinya kelelahan (*fatigue*) pada pipa.

Sehingga perlu adanya analisis mengenai kondisi *free span* yang terjadi. Dalam tugas akhir ini, analisis *freespan* yang dilakukan merupakan analisis dinamis *freespan*. Panjang *freespan* akan ditinjau dari kondisi *in-line* dan *cross flow*, fungsinya untuk mengetahui berapa banyak *freespan* yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F105 serta analisis kelelahan (*fatigue analysis*) yang akan menghasilkan umur kelelahan dari masing - masing *free span* tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi objek studi Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa jumlah *free span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F105?
2. Berapa nilai tegangan ekuivalen (*von misses*) pada masing – masing *span* yang memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F105?
3. Berapa umur kelelahan pada masing – masing *span* yang memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F105?

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui panjang *free span* yang memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F105

2. Mengetahui nilai tegangan ekuivalen (*von misses*) pada masing – masing *span* yang memenuhi kriteria *screening* kelelahan menurut DNV RP F 105
3. Mengetahui umur kelelahan pada masing - masing *span* yang tidak memenuhi kriteria *screening* kelelahan.

1.4 Manfaat

Dengan dilakukan analisis terhadap kelelahan pipa bawah laut diharapkan mampu memperlihatkan bentangan bebas mana saja yang tidak memenuhi kriteria *screening* pada analisa dinamis *free span* menurut DNV RP F105, dan mengetahui tegangan *von misses* dan *fatigue life* terkecil dari data aktual *free span* tersebut. Sehingga dapat disiapkan langkah mitigasi/ pencegahan awal pada pipa yang mengalami kondisi kritis.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis *span* yang ditinjau diasumsikan sebagai *span* tunggal.
2. Analisis *free span* dilakukan hanya pada kondisi operasi.
3. Pengaruh *scouring* dan *marine growth* diabaikan.
4. Kedalaman pada suatu bentangan bebas pipa dianggap sama dan rata.
5. Aliran yang mengenai pipa adalah tegak lurus dengan pipa.
6. Aliran fluida di dalam pipa diasumsikan aliran *steady*.
7. Tumpuan pada ujung - ujung bentangan bebas pipa diasumsikan sebagai tumpuan sederhana (*fixed-fixed*).
8. Analisis dinamis dan kelelahan *free span* menggunakan *code* DNV-RP-F105 tahun 2006 mengenai *Free Spanning Pipelines*.
9. Analisis tegangan pada *free span* menggunakan ASME B31.8 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*.

10. Panjang span yang ditinjau umur kelelahannya dipilih dari hasil *screening*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan beberapa hal yang membuat penelitian tugas akhir ini dilakukan, yaitu kondisi yang melatar belakangi sehingga penelitian ini penting untuk dilakukan. Perumusan masalah yang menjadi permasalahan dan perlu dijawab, pencapaian yang digunakan untuk menjawab permasalahan yang diangkat, manfaat yang diperoleh dari dilakukannya penelitian tugas akhir, dan batasan dari penelitian tugas akhir ini, serta gambaran dari sistematika laporan yang digunakan dalam tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini berisi tinjauan pustaka dan dasar teori, sebagaimana tinjauan pustaka yakni penjelasan singkat hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang menjadi acuan dari penelitian tugas akhir ini. Dan dasar teori yang berisi tulisan dan cuplikan penemuan ilmu pengetahuan dari peneliti, persamaan – persamaan yang terkait, dan *code* yang digunakan dalam penelitian tugas akhir sebagai pedoman dalam penelitian tugas akhir.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian menjelaskan langkah – langkah pengerjaan dalam menyelesaikan tugas akhir ini, serta metode – metode yang digunakan di dalamnya.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan data – data yang digunakan dalam tugas akhir, menerangkan permodelan yang dilakukan saat penyelesaian penelitian, analisis, pengolahan, dan pembahasan data dari hasil luaran permodelan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Menjelaskan tentang kesimpulan dari tugas akhir, hasil dari analisis yang dilakukan, pembahasan yang telah dilakukan serta rekomendasi dan saran – saran penulis sebagai pertimbangan untuk keperluan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi referensi yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir

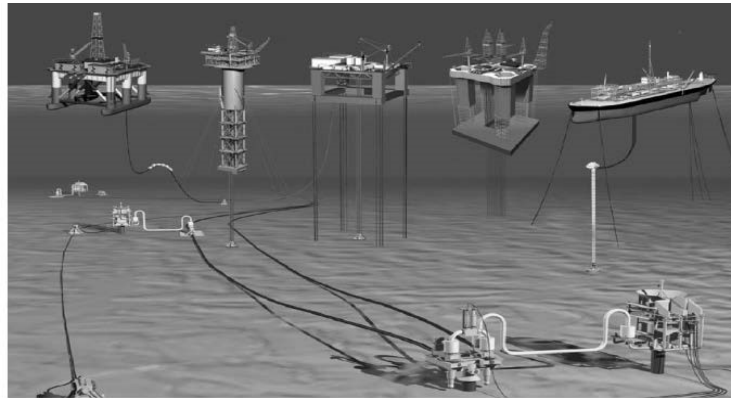
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Minyak dan gas merupakan sumber energi paling banyak yang digunakan oleh manusia. Sumber energi ini merupakan bagian mendasar pada kebutuhan hidup umat manusia. Hal ini menyebabkan semakin intensifnya usaha pencarian dan eksplorasi migas di daerah lepas pantai dan laut dalam. Untuk mengakomodasi penyaluran minyak dan gas bumi dari sumur-sumur minyak di lepas pantai dan di laut dalam, maka digunakan jaringan pipa bawah laut sebagai alternatif yang paling mudah, aman, dan efisien. Berikut contoh model jaringan pipa bawah laut ditampilkan pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Jaringan Pipa Bawah Laut

(Soegiono, 2007)

Pada dasarnya, telah banyak Tugas Akhir ataupun Skripsi yang telah dikerjakan mengenai *free span* pada pipa bawah laut. Banyak dari mereka yang menganalisis kelelahan akibat dari adanya VIV atau menghitung *scouring* yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengakibatkan terjadinya *free span*.

Menurut Keye et.al (dalam Arif, 2008), metode analisis *span* dibagi dua bagian, dan masing-masing memiliki 2 tahapan, dan terdiri dari analisis tegangan awal dan cek frekuensi getaran, kemudian diikuti

oleh analisis regangan serta analisis kelelahan apabila diperlukan. Dalam buku *Offshore Pipeline* (Guo, 2005) mengatakan bahwa resiko kerusakan pada *free span* pipa dapat terjadi dalam dua mekanisme yang terpisah, yang pertama adalah akibat *bending* yang berlebih karena beban hidrodinamis dan berat pipa itu sendiri, atau kerusakan akibat *fatigue* dalam kurun waktu panjang. Analisis *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa. Aliran dari gelombang dan arus yang timbul di sekitar pipa akan menimbulkan pusaran yang menghasilkan distribusi tekanan. Pusaran ini menghasilkan osilasi atau getaran pada pipa. Jika frekuensi dari pusaran ini mendekati frekuensi natural pipa, maka terjadi resonansi, dan inilah yang menyebabkan kelelahan pada pipa (Bai, 2001).

Syarif (2014) dalam tugas akhirnya juga membahas mengenai bentangan bebas pada pipa bawah laut. Analisis yang dilakukan adalah analisis umur kelelahan pada pipa bawah laut yang mengalami *freespan* akibat aliran internal dan beban eksternal. Selain itu, juga dilakukan variasi *flowrates* pada pipa untuk mengetahui perbandingan umur kelelahannya.

Basir (2015) pada penelitian tugas akhirnya juga menghitung besar tegangan dan umur kelelahan akibat pengaruh VIV pada *crossing pipelines*. Akan tetapi, analisis yang dibahas di dalam tugas akhir belum mencantumkan panjang span aktual dan keterbatasan dalam data *metocean* sehingga tidak dilakukan validasi menggunakan *software*. Panjang span aktual dan data *metocean* dibutuhkan untuk mendapatkan perhitungan perkiraan umur kelelahan yang lebih rinci dan sesuai dengan keadaan di lokasi yang ditinjau.

Pada tugas akhir ini penulis menganalisis panjang span aktual yang ada dalam kondisi dinamis, apakah *freespan* yang ada memenuhi *screening criteria* yang ditetapkan oleh DNV RP F105. Lalu dilanjutkan dengan analisis *fatigue* pada *freespan* pipa yang memenuhi sehingga dapat diketahui umur kelelahannya pada kondisi operasi.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Kondisi Pembebanan Pipa

Kenny (1993) mengklasifikasikan 4 kondisi pembebanan pipa bawah laut selama umur operasi, yaitu

a. Instalasi

Beban utama yang bekerja pada kondisi instalasi pipa bawah laut adalah beban gelombang, beban arus *steady* dan beban pipa itu sendiri (*self weight*). Selain itu, kombinasi tekanan dan beban *bending* akibat metode instalasi dan formasi *span* memberikan pengaruh signifikan pada perilaku pipa.

b. Kondisi Water Filled

Kondisi ini terjadi sebelum dan setelah dilakukan *hydrotest* pada pipa. Kondisi ini mungkin juga dapat terjadi jika pipa ditinggalkan sementara pada saat kondisi tertentu. Pipa yang ditinggalkan akan diisi air laut untuk meningkatkan stabilitas pipa (*on bottom stability*). Meningkatnya berat terendam pipa dapat mempengaruhi tegangan pada pipa.

c. Hydrotest

Pada saat *hydrotest*, pipa akan dialiri fluida (air laut) yang bertekanan tinggi yang melebihi tekanan desain pipa. Hal ini dilakukan untuk menguji integritas pipa bawah laut dan memeriksa ada tidaknya kebocoran pada pipa. Pipa pada kondisi ini akan mengalami pembebanan yang paling berat akibat kenaikan berat terendam dan tekanan internal yang tinggi.

d. Operasi

Setelah proses instalasi dan *hydrotest* dilakukan, pipa akan memasuki fase operasi. Pada saat operasi, pipa akan menerima tekanan internal dan suhu yang tinggi akibat aliran fluida (minyak atau gas) di dalam pipa.

2.2.2 Bentangan Bebas (*Freespan*)

Secara definisi, *free span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa dan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan

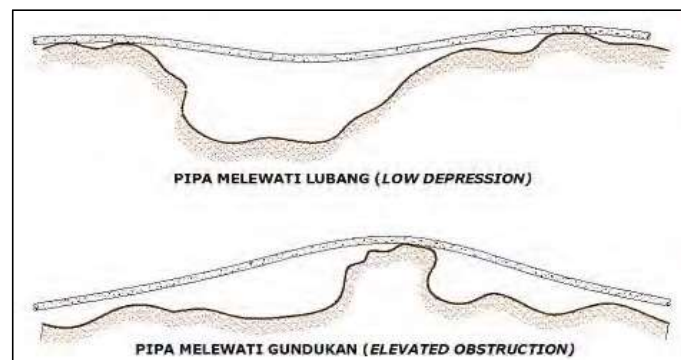
seabed (Guo et.al, 2005). *Free span* pada pipa dapat terjadi karena (DNV-RP F105, 2006):

1. Permukaan dasar laut yang tidak rata.
2. Perubahan topologi dasar laut (akibat *scouring*, *sand waves*)
3. *Support* buatan.
4. *Strudel scours*.

Adanya *free span* pipa ini membutuhkan sebuah *analisis*. Hal ini karena pada *free span* pipa bekerja gaya-gaya yang dapat menyebabkan kegagalan pipa. Pada *free span*, pipa harus cukup kuat melawan:

1. *Excessive yielding*
2. *Fatigue*
3. *Buckling*
4. Ovalisasi

Selain itu, dalam sebuah kasus *free span* juga dapat terjadi jika pada rute pipa tersebut memiliki persimpangan (*crossing*) dengan pipa atau kabel lain di bawah laut. Pada tahap *engineering & technical design*, pipa tidak disiapkan khusus dengan perlindungan terhadap *free span* dikarenakan biaya kapital yang menjadi lebih besar.



Gambar 2. 2 Tipe Umum *Free Span* Pipa Bawah Laut
(Pratama,2007)

Dari Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa *free span* pipa pada dasar laut memiliki tipikal seperti pada gambar. Bila terjadi suatu *free span* pada suatu rute pipa, maka diperlukan analisis kembali kekuatan dan keandalan

kerja pipa tersebut. Perhitungan dan persiapan antisipasi ini perlu dilakukan mengingat keadaan pipa yang sudah tidak tergeletak merata pada *seabed*. Aliran partikel air yang berasal dari gelombang dan arus di sekitar pipa dapat menggetarkan pipa akibat adanya pelepasan *vortex*. Apabila frekuensi pelepasan *vortex* mendekati nilai frekuensi natural pipa, akan terjadi resonansi. Pipa akan bergetar dan akan berisiko mengalami kegagalan akibat kelelahan.

2.2.3 Dimensi Pipa

Pipa bawah laut memiliki beberapa lapisan yaitu pipa baja, lapisan anti korosi (*corrosion coating*) dan selimut beton (*concrete coating*). Dimensi dari seluruh lapisan pipa ini harus dihitung sebagai langkah awal yang dilakukan dalam analisis pipa bawah laut.

Persamaan untuk menghitung dimensi pipa diuraikan pada Persamaan 2.1 – 2.9 sebagai berikut :

a) Tebal Dinding Pipa

Tebal dinding pipa yang dimaksud adalah ketebalan pipa tanpa ada tambahan perlindungan korosi, Persamaan tebal dinding pipa (DNV OS F101, 2013) dirumuskan pada Persamaan 2.1 sebagai berikut :

$$t_2 = t_{nom} - t_{corr} \quad (2.1)$$

t_{nom} = Tebal nominal dinding pipa (m)

t_{corr} = Tebal *corrosion allowance* (m)

Tebal dinding pipa diatas digunakan untuk analisis kegagalan pipa dibawah pengaruh kondisi beban ekstrim dan pertimbangan kondisi operasi pipa.

b) Diameter Total Pipa

Diameter total pipa merupakan diameter pipa secara keseluruhan termasuk diameter pipa baja, lapisan anti korosi, selimut beton (*concrete coating*) dan *marine growth*. Diameter total pipa dirumuskan pada Persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$D_t = D_0 + 2t_{cc} + 2t_{conc} + 2t_{mg} \quad (2.2)$$

D_t = Diameter total pipa (m)

D_0 = Diameter luar pipa baja (m)

t_{cc} = Tebal lapisan anti korosi (m)

t_{conc} = Tebal *concrete coating* (m)

t_{mg} = Tebal marine growth (m)

c) Diameter Dalam Pipa

Diameter dalam pipa adalah diameter maksimal yang dapat dilewati oleh fluida yang dialirkan di dalamnya. Ditampilkan pada Persamaan 2.3 berikut :

$$D_i = D_0 - 2(t_{nom} + t_{int}) \quad (2.3)$$

D_i = Diameter dalam pipa (m)

t_{int} = Tebal lapisan anti korosi internal (m)

d) Diameter Selimut beton (*concrete*)

Concrete coating memiliki fungsi sebagai pemberat untuk meningkatkan stabilisasi pipa di dasar laut (Soegiono, 2007). Di dalam DNV OS F101, ketebalan minimal *concrete coating* adalah 40 mm. Diameter *concrete coating* dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.4 berikut :

$$D_{wc} = D_0 + 2(t_{cc} + t_{conc}) \quad (2.4)$$

D_{wc} = Diameter selimut beton (*concrete*) (m)

e) Diameter Lapisan Anti Korosi (*Corrosion Coating*)

$$D_{cc} = D_0 + 2 t_{cc} \quad (2.5)$$

D_{cc} = Diameter *corrosion coating* (m)

f) Momen Inersia Pipa Baja

$$I_{st} = \pi \frac{(D_0^4 + D_i^4)}{64} \quad (2.6)$$

$$I_{st} = \text{Momen inersia pipa baja} \quad (\text{m}^4)$$

g) Momen Inersia Selimut Beton (*concrete*)

$$I_{conc} = \pi \frac{(Dt^4 + Dconc^4)}{64} \quad (2.7)$$

$$I_{conc} = \text{Momen inersia selimut beton} \quad (\text{m}^4)$$

h) Luas Penampang Internal Pipa Baja

$$A_i = \pi \frac{Di^2}{4} \quad (2.8)$$

$$A_i = \text{Luas penampang internal pipa baja} \quad (\text{m}^2)$$

i) Luas Penampang Pipa Baja

$$A_{st} = \pi \frac{(D0^2 - Di^2)}{4} \quad (2.9)$$

$$A_{st} = \text{Luas penampang pipa baja} \quad (\text{m}^2)$$

2.2.4 Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa merupakan penjumlahan massa pipa, massa konten pipa, massa tambah dan massa selimut beton pipa (*concrete*). Menurut bai dan bai (2005), persamaan massa efektif pipa dijelaskan pada Persamaan 2.10 sebagai berikut,

$$m_e = m_{str} + m_c + m_a \quad (2.10)$$

$$m_{str} = \text{Massa Struktur Pipa (termasuk coating)} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_c = \text{Massa konten Pipa} \quad (\text{kg/m})$$

$$m_a = \text{Massa Tambah} \quad (\text{kg/m})$$

a. Massa Struktur Pipa

Massa struktur pipa merupakan penjumlahan massa pipa ditambah dengan massa lapisan anti korosi dan selimut beton (*concrete*).

Persamaan untuk mendapatkan massa struktur pada pipa dijelaskan pada Persamaan 2.11 – 2.14

$$m_{str} = m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \quad (2.11)$$

$$m_{st} = A_{st} \cdot \rho_{st} \quad (2.12)$$

$$m_{cc} = \pi \frac{(Dcc^2 - D0^2)}{4} \cdot \rho_{cc} \quad (2.13)$$

$$m_{conc} = \pi \frac{(Dwc^2 - D0^2)}{4} \cdot \rho_{conc} \quad (2.14)$$

m_{str}	= Massa struktur pipa	(kg/m)
m_{st}	= Massa pipa baja	(kg/m)
m_{cc}	= Massa lapisan anti korosi	(kg/m)
m_{conc}	= Massa selimut beton	(kg/m)
ρ_{st}	= Massa jenis baja	(kg/m ³)
ρ_{cc}	= Massa jenis lapisan anti korosi	(kg/m ³)
ρ_{conc}	= Massa jenis selimut beton	(kg/m ³)

b. Massa Konten Pipa

$$m_c = A_i \cdot \rho_c \quad (2.15)$$

ρ_c = Massa jenis konten pipa (kg/m³)

c. Massa Tambah Pipa

$$m_a \frac{\pi}{4} D_t^2 \cdot \rho_w \cdot C_a \quad (2.16)$$

ρ_w = Massa jenis air laut (kg/m³)

C_a = Koefisien massa tambah

Menurut DNV RP F105, koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan Persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$C_a = \begin{cases} 0,68 + \frac{1,6}{1+5\left(\frac{e}{D_t}\right)} & \text{untuk } \left(\frac{e}{D_t}\right) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \left(\frac{e}{D_t}\right) > 0.8 \end{cases} \quad (2.17)$$

e/D_t = Rasio *gap span*

e = Jarak antara *seabed* dan pipa (m)

2.2.5 Berat Terendam Pipa

Berat pipa yang tercelup di bawah air akan memiliki berat yang berbeda dibandingkan saat di daratan. Berat pipa yang berada dibawah air akan lebih ringan dibandingkan dengan di daratan karena adanya gaya *buoyancy* (gaya apung). Persamaan untuk menghitung berat terendam pipa ditampilkan pada Persamaan 2.18 berikut :

$$W_{sub} = (m_{st} + m_c + m_{cc} + m_{wc}). g - F_b \quad (2.18)$$

$$F_b = \text{Gaya Apung (Bouyancy)} \quad (\text{N/m})$$

Gaya apung dijelaskan pada Persamaan 2.19 dan 2.20 berikut :

$$F_b = m_{disp} . g \quad (2.19)$$

$$m_{disp} = \text{Massa air yang dipindahkan (kg/m)}$$

$$= \frac{\pi}{4} D_t^2 . \rho_w \quad (2.20)$$

2.2.6 Beban Lingkungan

Beban ini bekerja pada pipa akibat adanya kondisi lingkungan yang terjadi. Untuk beban pada pipa bawah laut, tentunya yang mempengaruhi adalah beban gelombang dan beban arus. Untuk mendapatkan data beban lingkungan yang tentunya bersifat acak, maka data yang digunakan untuk analisis adalah data periode ulang (*return period*). Periode ulang merupakan data rata – rata beban yang terjadi.

2.2.6.1 Gelombang

Pada kenyataan, gelombang laut tidaklah linier melainkan mempunyai pola acak dalam elevasi dan propagasinya. Dengan demikian teori gelombang regular tidak dapat dipakai secara langsung dalam menjelaskan gelombang acak (Djarmiko, 2012). Untuk gelombang acak kurun waktu pendek (*short term wave condition*) dapat dijelaskan menggunakan spectra gelombang. Menurut DNV RP F105 (2016), spektra yang sesuai digunakan untuk menjelaskan gelombang acak adalah spectra JONSWAP.

JONSWAP sendiri merupakan singkatan dari *Joint North Sea Wave Project*, yaitu proyek yang dilakukan secara bersama – sama oleh sejumlah negara untuk melakukan penelitian gelombang di perairan utara. Spektra JONSWAP cukup cocok digunakan di Indonesia karena perairan Indonesia termasuk perairan tertutup atau kepulauan. Berikut Persamaan 2.21 mengenai spektra JONSWAP.

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha . g^2 . \omega^{-5} . \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) . \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma.\omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.21)$$

dengan:

$S_{\eta\eta}$	= Spektra gelombang	
ω	= Frekuensi gelombang	(rad/s)
ω_p	= Frekuensi puncak gelombang	(rad/s)
α	= Konstanta Generalized Philips	
g	= Percepatan gravitasi (9,81 m/s ²)	
γ	= <i>Peak-enhancement factor</i>	
σ	= Parameter lebar spectra	

Persamaan 2.22 mengenai konstanta Generalized Philips yakni:

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \quad (2.22)$$

dengan:

H_s	= Tinggi gelombang signifikan (m)
ω_p	= Frekuensi gelombang puncak
g	= Percepatan gravitasi (9,81 m/s ²)
γ	= <i>Peak-enhancement factor</i>

Kemudian parameter lebar spektra yakni:

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.23)$$

Untuk *Peak-enhancement factor* yang digunakan yakni:

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.24)$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang (*wave induced velocity spectrum*) di *seabed* $S_{UU}(\omega)$ bisa ditentukan melalui transformasi spektra gelombang pada permukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama ditampilkan pada Persamaan 2.25:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.25)$$

dengan:

G	= <i>Transfer Function</i>
$S_{\eta\eta}$	= Spektrum JONSWAP

Fungsi transfer G mentransnformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut, yakni pada Persamaan 2.26 berikut ini:

$$G(\omega) = \frac{\omega \cosh(k.(D+e))}{\sinh(k.d)} \quad (2.26)$$

dimana d dan k di iterasi dari persamaan *transcendental* sebagai berikut:

$$\frac{\omega^2}{g} = k. \tanh(k. d) \quad (2.27)$$

dengan:

ω = Frekuensi gelombang

g = Percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

k = Angka gelombang

d = Kedalaman perairan

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa (U_s) dan *mean zero-up crossing* dari osilasi aliran pipa (T_u) dijelaskan pada Persamaan 2.28 dan 2.29

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.28)$$

dengan:

M_0 = Momen spektra orde pertama

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.29)$$

dengan:

M_0 = Momen spektra orde pertama

M_2 = Momen spektra orde ke-2

M_0 dan M_2 dapat ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan momen spektra pada orde ke-n:

$$M_n = \int_0^\infty \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.30)$$

dengan:

ω = Frekuensi gelombang

Kecepatan aliran gelombang signifikan pada elevasi pipa akan mengalami penurunan karena pengaruh arah dan sebaran gelombang. Persamaan kecepatan aliran gelombang normal pada pipa dan pengaruh sebaran gelombang adalah sebagai berikut :

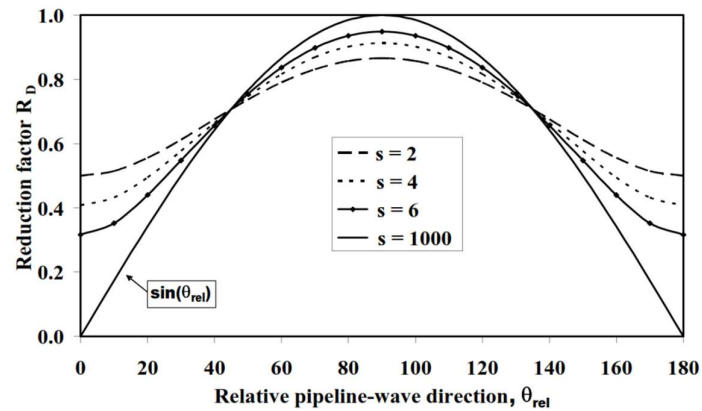
$$U_w = U_s \cdot R_D \quad (2.31)$$

U_w = Kecepatan aliran gelombang normal pada pipa, dipengaruhi arah dan sebaran gelombang (m/s)

U_s = Kecepatan arus akibat gelombang (m/s)

R_D = *Reduction factor*, akibat efek arah dan sebaran gelombang.

Nilai R_D dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.3



Gambar 2.3 Gambar *Reduction Factor* Akibat Efek Arah & Sebaran Gelombang

2.2.6.2 Arus

Beban arus yang terdiri dari data kecepatan dan arah arus didapat dari pengukuran di laut. Pengukuran pada suatu rute pipa bawah laut dibagi menjadi beberapa zona pengukuran. Dengan memperhitungkan efek *boundary layer*, maka alat pengukur (*current meter probe*) diletakkan pada suatu elevasi referensi. Data arus yang diperoleh bersifat diskrit, per detik, per menit atau per jam. Dari data diskrit ini lalu dilakukan analisis spektrum kecepatan dan diambil rata – ratanya. Asumsi yang digunakan adalah arus dianggap *steady current*, yang terdiri dari :

1. Arus pasang surut
2. *Wind induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
3. *Storm surge induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
4. *Density driven current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.

Di dalam DNV RP F105, kecepatan arus pada level pipa dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.32 berikut :

$$U_c = R_c \cdot U(z_r) \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \quad (2.32)$$

Dimana.

U_c = Kecepatan arus pada level pipa (m/s)

$U(z_r)$ = Kecepatan arus pada ketinggian referensi (m/s)

R_c = Faktor reduksi kecepatan arus

$$R_c = \sin(\theta_{rel}) \quad (2.33)$$

θ_{rel} = Sudut datang aliran arus terhadap pipa (o)

z = Elevasi diatas dasar laut (m)

$$z = e + \frac{Dt}{2} \quad (2.34)$$

z_r = Elevasi referensi (m)

z_0 = Parameter kekasaran dasar laut (m), untuk nilai parameter

seusai DNV RP F105 ditampilkan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Seabed Roughness Parameter Sand

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

(Sumber: DNV RP F105, 2006)

2.2.7 Kriteria Aliran

Dengan telah diketahuinya besar kecepatan arus dan partikel gelombang. Maka besar kecepatan arus total tersebut harus diklasifikasikan untuk pengambilan analisis selanjutnya. Dasar dari pembagian kriteria ini adalah rasio antara kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang yaitu sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{U_c}{U_w + U} \quad (2.35)$$

Keterangan :

U_c : Kecepatan arus (m/s)

U_w : Kecepatan Gelombang (m/s)

Rasio dari kecepatan arus dan kecepatan partikel ini merupakan factor yang menentukan dampak aliran arus terhadap pipa. Adanya aliran yang melewati pipa menyebabkan pipa memiliki respon, dalam arah *in-line* (searah arus) dan arah *cross-flow* (tegak lurus vertikal arah arus). Tabel kriteria respon dan dampak terhadap pipa berdasarkan rasio kecepatan arus dan gelombang ditampilkan Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran Arus

(DN RP F-105,2006)

$\alpha < 0,5$	<u>Gelombang Dominan ($U_w > U_c$)</u>
	<u>Arah In-line :</u> Pembebanan arah <i>in-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex sheeding</i> diabaikan
	<u>Arah Cross-flow :</u> Beban arah <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex sheeding</i> asimetris
$0,5 < \alpha < 0,8$	<u>Gelombang Dominan ($U_w < U_c$)</u>
	<u>Arah In-line :</u> Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex sheeding</i> berkurang dengan keberadaan gelombang
	<u>Arah Cross-flow :</u> Beban <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex sheeding</i> asimetris dan menunjukkan situasi arus yang dominan

Tabel 2. 2 Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran Arus (Lanjutan)

$0,8 < u$	<u>Arus Dominan</u> ($U_c \gg U_w$)
	<p><u>Arah <i>In-line</i> :</u></p> <p>Pembebanan <i>In-line</i> berdasarkan <i>steady drag component</i> dan <i>oscillatory component</i> akibat <i>vortex sheeding</i>.</p> <p>Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison diabaikan</p>
	<p><u>Arah <i>cross-flow</i> :</u></p> <p>Pembebanan arah <i>cross-flow</i> secara siklik akibat <i>vortex sheeding</i>, dan menunjukkan situasi arus murni yang dominan</p>

2.2.8 Gaya Hidrodinamis

Pipa bawah laut yang terletak di dasar laut akan terkena gaya hidrodinamis yang muncul akibat aksi gelombang dan arus laut. Variasi gaya yang terjadi cukup kompleks. Persamaan analitis sederhana hanya dapat menjelaskan pendekatan persamaan gaya yang terjadi pada pipa (Braestrup dkk, 2005). Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa di dasar laut terdiri dari gaya *drag*, gaya inersia dan gaya *lift* (angkat).

2.2.8.1 Gaya *Drag*

Gaya *drag* adalah gaya yang berkaitan dengan kecepatan akibat arus *steady* yang dibangkitkan oleh gelombang. Kecepatan arus total (kecepatan arus akibat gelombang dan kecepatan arus pada elevasi pipa) mempengaruhi nilai dari gaya drag. Besar gaya *drag* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 2.36 :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_c)^2 \quad (2.36)$$

F_D = gaya *drag* (N/m)

C_D = koefisien *drag* (persamaan 2.33)

Koefisien *drag* di dalam DNV RP F105 (2006) ditentukan dengan Persamaan 2.37 sebagai berikut :

$$C_D = C_D^0 \left(\frac{k}{D_t} \right) \cdot \psi_{KC,\alpha}^{CD} \cdot \psi_{proxi}^{CD} \cdot \psi_{trench}^{CD} \cdot \psi_{VIV}^{CD} \quad (2.37)$$

Setiap parameter koefisien *drag* diatas dijelaskan sebagai berikut :

- a. Koefisien *Drag* Dasar untuk Aliran *Steady* $\left(C_D^0 \left(\frac{k}{D_t} \right) \right)$

Koefisien *drag* dasar merupakan fungsi kekasaran permukaan pipa $\left(\frac{k}{D_t} \right)$

Ketentuan koefisien *drag* dasar dijelaskan pada Persamaan 2.38 :

$$C_D^0 \left(\frac{k}{D_t} \right) = \begin{cases} 0,65 & ; \left(\frac{k}{D_t} \right) < 10^{-4} \text{ (smooth)} \\ 0,65 \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10} \left(\frac{k}{D_t} \right) \right) & ; 10^{-4} < \left(\frac{k}{D_t} \right) < 10^{-2} \\ 1,05 & ; \left(\frac{k}{D_t} \right) < 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases} \quad (2.38)$$

k = kekasaran permukaan pipa (m), ditampilkan pada Tabel 2.3

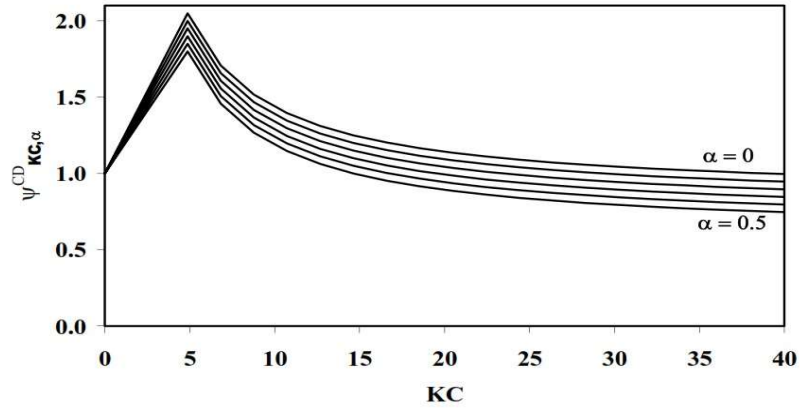
Tabel 2. 3 Kekasaran Permukaan Pipa

<i>Pipe Surface</i>	<i>k (metres)</i>
<i>Steel, surface</i>	10-6
<i>Steel, un-coated</i>	10-5
<i>Concrete</i>	1/300
<i>Marine Growth</i>	1/200 → 1/20

- b. Faktor Koreksi untuk Aliran *Unsteady* ($\psi_{KC,\alpha}^{CD}$)

Faktor koreksi ini digunakan untuk mempertimbangkan efek *unsteadiness* dari aliran fluida, termasuk efek bilangan *Keulegan-Carpenter* dan rasio aliran arus. Ketentuan ($\psi_{KC,\alpha}^{CD}$) dijelaskan pada Persamaan 2.39 dan Gambar 2.3 berikut :

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0,85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \alpha \leq 0,5 \\ 0,6 + \frac{6}{KC} & \alpha > 0,5 \end{cases} \quad 5 < KC < 4 \quad (2.39)$$



Gambar 2.3 Grafik $\psi_{KC,\alpha}^{CD}$ untuk $KC < 5$

- c. Faktor Koreksi Perkiraan Kondisi Dasar Laut (ψ_{proxi}^{CD})

Ketentuan ψ_{proxi}^{CD} dijelaskan pada Persamaan 2.40:

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0,9 + \frac{0,5}{\left(1 + 5 \cdot \frac{e}{D_t}\right)} - \frac{\alpha}{2} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0,8 \\ 1 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2.40)$$

- d. Faktor Koreksi Akibat Pengaruh *Trench* (ψ_{trench}^{CD})

Ketentuan ψ_{trench}^{CD} dijelaskan pada Persamaan 2.41:

$$\psi_{trench}^{CD} = 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\Delta}{D_t} \right) \quad (2.41)$$

- e. Faktor Amplifikasi Akibat Getaran *Cross-Flow* ψ_{VIV}^{CD}

Merupakan faktor tambahan karena pipa mengalami getaran *cross-flow*. Ketentuan ψ_{VIV}^{CD} dijelaskan pada Persamaan 2.42 :

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D_t} \right)^{0,65} \quad (2.42)$$

2.2.8.2 Gaya Inersia

Pipa bawah laut yang berinteraksi dengan fluida yang dipercepat akan mengalami gaya yang proporsional dengan percepatan dari fluida tersebut (Bai, 2001). Beban siklis akibat gelombang akan mengurangi atau menambah kecepatan air. Pipa akan memberikan gaya untuk menolahkan perubahan kecepatan partikel air yang bekerja pada pipa. Besar gaya inersia dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.43:

$$F_I = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_M \cdot a_n \quad 2.43$$

- F_I = Gaya inersia (N/m)
 ρ_w = Massa jenis air laut
 C_M = Koefisien gaya inersia = $C_a + 1$
 D_t = Total diameter terluar pipa (termasuk *coating*)
 a_n = Percepatan partikel air (m/s²)

2.2.8.3 Gaya *Lift*

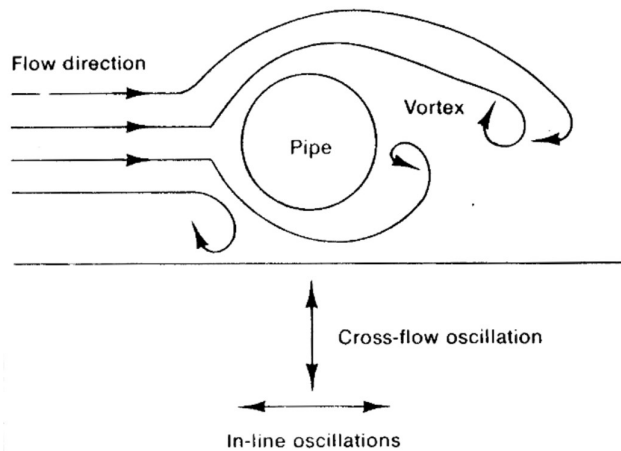
Gaya Lift atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Ketika kecepatan aliran air di atas pipa lebih cepat dibandingkan kecepatan aliran air di bawah pipa, tekanan aliran yang muncul di atas pipa akan lebih kecil dibandingkan tekanan aliran di bawah pipa. Perbedaan tekanan ini akan mengakibatkan pipa terangkat. Besar gaya angkat dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2.44:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_t \cdot C_L \cdot (U_w + U_c)^2 \quad (2.44)$$

- F_L = Gaya lift (N/m)
 ρ_w = Massa jenis air laut
 D_t = Total diameter terluar pipa (termasuk *coating*)
 C_L = Koefisien gaya lift
 U_w = Kecepatan partikel air akibat gelombang
 U_c = Kecepatan arus laut

2.2.9 *Vortex Induced Vibration (VIV)*

Ketika partikel air mengalir melalui pipa bawah laut, *vortices* (pusaran) akan terbentuk di daerah pipa (gambar). Pusaran ini terbentuk karena turbulensi dan ketidakstabilan aliran di belakang pipa. Pelepasan pusaran (*vortex shedding*) ini perubahan terhadap tekanan hidrodinamis pada pipa secara periodik. Perubahan tekanan hidrodinamis ini dapat menyebabkan pipa bergetar, terutama pipa yang mengalami bentangan bebas (Mouselli, 1981). Berikut permodelan *vortex induced vibration* ditampilkan pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 *Vortex Induced Vibration*

(Sumber : Mouselli, 1981)

2.2.9.1 Frekuensi *Vortex Shedding* (f_s)

Frekuensi *vortex shedding* sangat berhubungan dengan diameter pipa dan kecepatan aliran. Jika frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi natural bentangan bebas pipa, maka resonansi akan terjadi dan pipa mengalami getaran. Pipa dapat mengalami kegagalan akibat *vortex induced vibration*. Kegagalan pipa ini dapat dicegah jika frekuensi *vortex shedding* memiliki perbedaan cukup besar dengan frekuensi natural pipa (Mouselli, 1981). Persamaan frekuensi *vortex shedding* adalah sebagai berikut:

$$f_s = S_t \left(\frac{U_{tot}}{D_t} \right) \quad (2.45)$$

S_t = Strouhal number (0.2 untuk silinder bulat)

U_{tot} = Kecepatan partikel air (m/s)

$$= U_w + U_c$$

2.2.9.2 Reynold Number

Persamaan *reynold number* adalah sebagai berikut :

$$Re = \frac{U_{tot} \cdot D_t}{\nu} \quad (2.46)$$

ν = Viskositas kinematis air laut (m^2/s)

$$= 9,3 \times 10^{-3}$$

2.2.9.3 Stability Parameter

Sumer dan Fredsoe (1994) di dalam Choi (2000) menjelaskan bahwa *Stability parameter* menentukan keunikan amplitudo getaran maksimum. Persamaan *Stability parameter* adalah sebagai berikut:

$$K_s = \frac{4 \pi m_e \zeta_r}{\rho_w D t^2} \quad (2.47)$$

m_e = Massa efektif pipa (kg/m)

ζ_r = Total modal *damping ratio*

Di dalam DNV RP F105 (2006) total modal *damping ratio* terdiri dari :

- *Structural damping* (ζ_{str}), merupakan *damping* yang diakibatkan oleh gaya gesekan internal material pipa. Jika tidak tersedia data yang detail, *structural damping* dapat diasumsikan sebesar 0.05. Jika terdapat concrete, maka geser pada permukaan selimut beton dan *corrossion coating* dapat meningkatkan *damping* menjadi 0.01-0.02.
- *Hidrodanamic damping* (ζ_h), untuk VIV yang terletak di daerah *lock-in* nilainya dapat dianggap 0
- *Soil damping* (ζ_{soil}), untuk tujuan *screening* bernilai 0.01.
- Di dalam DNV RP F105, *stability parameter* ini dibagi dengan *safety factor* untuk meningkatkan keamanan.

$$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma k} \quad (2.48)$$

2.2.9.4 Reduced Velocity

Reduced velocity merupakan kecepatan aliran partikel air dimana getaran pada pipa akibat *vortex shedding* terjadi (Guo dkk, 2014). Persamaan *reduced velocity* adalah sebagai berikut:

$$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_n \cdot D_t} \quad (2.49)$$

U_c = Kecepatan normal arus pada pipa (m/s)

U_w = Kecepatan aliran gelombang signifikan yang mengenai pipa (m/s)

f_n = Frekuensi natural pipa (H_z)

D_t = Diameter luar pipa (m)

2.2.9.5 Current Flow Ratio

$$\alpha = \frac{U_{c100 \text{ tahu}}}{U_{c100 \text{ tahun}} \cdot U_{w1 \text{ tahun}}} \quad (2.50)$$

2.2.9.6 Keluegan Carpenter Number (KC)

$$\alpha = \frac{U_w}{f_w D} \quad (2.51)$$

f_w = Frekuensi gelombang (rad/s)

2.2.10 Safety Factor

Safety factor merupakan faktor yang digunakan untuk meningkatkan keamanan suatu parameter analisis. *Safety factor* memiliki nilai yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pada suatu parameter analisis. Nilai *safety factor* untuk setiap parameter analisis terdapat di dalam DNV RP F105 dijelaskan di dalam Tabel 2.4 dan Tabel 2.5 berikut

Tabel 2. 4 *Safety Factor* untuk *Screening Criteria*

γ_{IL}	1.4
γ_{CF}	1.4

(Sumber : DNV RP F105, 2006)

Tabel 2. 5 *Safety Factor* untuk Parameter VIV

<i>Safety Factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

(Sumber : DNV RP F105, 2006)

2.2.11 Dynamic Soil Stiffness

Dynamic soil stiffness muncul akibat adanya interaksi pipa bawah laut dengan tanah di lokasi pipa. *Dynamic soil stiffness* muncul di dua arah interaksi pipa yaitu arah vertikal dan horizontal. *Dynamic soil stiffness* vertikal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya

vertikal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* vertikal pipa. Sedangkan *Dynamic soil stiffness* horizontal merupakan kekakuan tanah yang dipengaruhi gaya horizontal dinamis antara pipa dan tanah per satuan panjang pipa dan *displacement* horizontal pipa.

Jika kondisi topologi di daerah pipa tidak kompleks dan tanah bersifat homogen, nilai *dynamic soil stiffness* dapat ditentukan menggunakan Persamaan 2.52 dan 2.53 sesuai persamaan yang tertera pada DNV RP F105 berikut :

- Vertikal

$$K_v = \frac{C_v}{1-v_{soil}} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.52)$$

K_v = *Dynamic soil stiffness* vertikal (kN/m/m)

C_v = Koefisien *dynamic soil stiffness* vertikal (kN/m^{5/2})

- Horizontal

$$K_L = C_L(1 + v_{soil}) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t} \quad (2.53)$$

K_L = *Dynamic soil stiffness* horizontal (kN/m/m)

C_L = Koefisien *dynamic soil stiffness* horizontal (kN/m^{5/2})

v_{soil} = *Poisson ratio* tanah

$\frac{\rho_s}{\rho}$ = Rasio massa spesifik antara massa pipa (tanpa massa tambah) dan massa air yang dipindahkan

2.2.11.1 **Koefisien Dynamic Soil Stiffness**

Koefisien *dynamic soil stiffness* ditentukan di dalam DNV RP F105 untuk setiap jenis tanah. Pada tugas akhir ini, jenis tanah di lokasi pipa merupakan *fine to loose sand* sehingga koefisien yang digunakan dijelaskan pada Tabel 2.6 berikut :

Tabel 2. 6 Koefisien *Dynamic Soil Stiffness* untuk Tanah Jenis Pasir

<i>Sand type</i>	C_V ($kN/m^{5/2}$)	C_L ($kN/m^{5/2}$)	$K_{V,S}$ ($kN/m/m$)
Loose	10500	9000	250
Medium	14500	12500	530
Dense	21000	18000	1350

(Sumber : DNV RP F105, 2006)

2.2.11.2 *Poisson Ratio Tanah*

Poisson ratio dari tanah di dalam DNV RP F105 ditentukan untuk setiap jenis tanah. *Poisson ratio* untuk jenis tanah *sand* dijelaskan pada Tabel 2.7 berikut :

Tabel 2. 7 Parameter Geoteknik untuk Jenis Tanah Pasir

(Sumber : DNV RP F105, 2006)

<i>Soil type</i>	ϕ_s	γ_{soil}' [kN/m^3]	ν	e_s
Loose	28 – 30°	8.5 – 11.0	0.35	0.7 – 0.9
Medium	30 – 36°	9.0 – 12.5	0.35	0.5 – 0.8
Dense	36 – 41°	10.0 – 13.5	0.35	0.4 – 0.6

2.2.12 Frekuensi Natural Pipa

Sebuah benda memiliki frekuensi natural yang merupakan jumlah getaran alami sebuah benda yang dihasilkan tiap detik. Walaupun benda tidak diberikan pemicu untuk bergetar (gaya luar), benda tersebut akan senantiasa bergetar tetapi tidak dalam nilai yang besar. Setiap stuktur memiliki frekuensi natural yang berbeda tergantung dari massa dan kekauannya. Craig (1981) menjelaskan bahwa frekuensi natural sebuah struktur dapat ditentukan dengan mengabaikan pemicu dari gaya luar dan redaman dari struktur (*Undamped Free Vibration*). Frekuensi natural di dalam DNV RP F105 (2006) dijelaskan di dalam persamaan *fundamental natural frequency* pada Persamaan 2.54 :

$$f_1 \approx C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{E_{st} \cdot I_{st}}{m_e \cdot L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)} \quad (2.54)$$

f_1 = *fundamental natural frequency* (Hz)

C_1, C_3 = *boundary condition coefficient*

CSF = *concrete stiffness factor*

E_{st} = *Young's modulus* pipa baja (N/m²)

I_{st} = *momen inersia* pipa baja (m⁴)

m_e = *massa efektif* pipa (kg/m)

L_{eff} = *panjang bentangan bebas efektif* (m)

S_{eff} = *effective axial force* (N)

P_{cr} = *critical buckling load* (N)

δ = *static deflection* (m)

Setiap parameter *fundamental natural frequency* dijelaskan pada subbab selanjutnya.

2.2.12.1 *Effective Axial Force*

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kelakuan, maka pipa bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada suatu *free span*, pipa mengalami regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat temperatur *content*, dan juga tekanan *content* tersebut. Oleh karena itu, pipa bawah laut memiliki karakteristik yang unik dalam analisis mekanika teknik, sehingga tidak dapat disebut balok. Sebuah *free span* akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga disimpulkan ada gaya aksial yang bekerja padanya. Pada umumnya perpanjangan ini menjad suatu lendutan vertikal. Di dalam DNV RP F105, penentuan nilai *fundamental natural frequency* membutuhkan parameter *effective axial force* yang dijelaskan dalam Persamaan 2.55 berikut :

$$S_{eff} = H_{eff} - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot P_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \quad (2.55)$$

H_{eff}	= <i>Effective lay tension</i> (N)
ν	= <i>Poisson's ratio</i> baja (0.3)
P_i	= Perbedaan tekanan internal (Pa)
D_i	= Diameter dalam pipa (m)
α_e	= Koefisien ekspansi suhu ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	= Perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
A_{st}	= Luas penampang pipa baja (m^2)

2.2.12.2 **Critical Buckling Load**

Critical buckling load dipengaruhi oleh kekakuan pipa, berat terendam pipa dan pengaruh kontak pipa dengan tanah (Bai dan Bai, 2014). Di dalam DNV RP F105, *critical buckling load* dapat ditentukan dengan Persamaan 2.56 berikut :

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2} \quad (2.56)$$

C_2 = Boundary condition

2.2.12.3 **Static Deflection**

Bentangan bebas pipa akan mengalami lendutan atau defleksi di sepanjang bagian tengah pipa yang tidak ditumpu oleh tanah. Defleksi ini terjadi di arah *cross-flow* dan *in-line*. Defleksi untuk arah *cross-flow* disebabkan karena beban terendam pipa, sedangkan untuk arah *in-line* disebabkan karena beban hidrodinamis. Terjadinya defleksi dapat meningkatkan risiko kegagalan *buckling* pipa. Di dalam DNV RP F105, *static deflection* dijelaskan dalam Persamaan 2.57 berikut :

$$\delta = C_6 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.57)$$

q = *Deflection load per unit length* (N/m)

2.2.12.4 **Concrete Stiffness Factor (CSF)**

Fungsi penambahan selimut beton adalah untuk menambah berat pipa sehingga dapat meningkatkan kestabilan pipa di dasar laut. Selain itu, penambahan selimut beton dapat mempengaruhi

kekakuan pipa. *Concrete stiffness factor* menunjukkan kekakuan selimut beton relatif terhadap kekakuan pipa baja. Persamaan CSF dijelaskan pada Persamaan 2.58 berikut :

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} \quad (2.58)$$

k_c = konstanta empiris

= 0.33 untuk *asphalt* dan 0.25 untuk *PP/PE coating*

EI_{conc} = *bending stiffness* selimut beton

EI_{steel} = *bending stiffness* pipa baja

2.2.12.5 **Boundary Condition**

Untuk melakukan analisis *free span*, diharuskan untuk menentukan kondisi peletakan dari *free span* yang ditinjau. Dalam hal ini DNV RP F105 telah memberikan 3 macam kondisi peletakan sesuai dengan teori pembebanan. Berikut ini adalah keterangan penggunaan dari 3 kondisi peletakan.

1. *Pinned-pinned* : Digunakan untuk *span* yang masing – masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line & cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
2. *Fixed-fixed* : Digunakan untuk *span* yang masing – masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-lne* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
3. *Pinned-fixed* : Digunakan untuk *span* yang salah satu ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya, sedangkan ujung yang lain masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya.

Boundary condition coefficient (C1-C6) ditentukan dalam DNV RP F105 yang disajikan pada Tabel 2.8 berikut :

Tabel 2. 8 *Boundary Condition Coefficient*

	Pinned - Pinned ²⁾	Fixed - Fixed ³⁾	Single span on seabed
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C ₄	4.93	14.1	Shoulder $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span : 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384

1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for.

2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} .

3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition.

4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

2.2.12.6 *Panjang Bentangan Bebas Efektif*

Dalam analisa panjang bentangan bebas pipa bawah laut menggunakan DNV RP F105, digunakan parameter panjang bentangan bebas yaitu panjang bentangan bebas efektif. Panjang bentangan bebas efektif digunakan untuk mempertimbangkan efek tumpuan *fully fixed* pada bentangan bebas pipa. Persamaan panjang bentangan bebas efektif dijelaskan pada Persamaan 2.59 dan 2.60 :

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066 \beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & \text{untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036 \beta^2 + 0,61\beta + 1,0} & \text{untuk } \beta < 2,7 \end{cases} \quad (2.59)$$

dengan,

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1+CSF)E_{st} \cdot I_{st}} \right) \quad (2.60)$$

L_{eff} : Panjang efektif *span* (m)

L : Panjang aktual *free span* (m)

β : *Relative soil stiffness parameter*

K : *Relevant soil stiffness* (vertikal atau horisontal, statis atau dinamis)

CSF : faktor kekakuan *concrete*

E_{st} : *Young's modulus* pipa baja (N/m²)

I_{st} : momen inersia pipa baja

2.2.13 Screening Kriteria *Fatigue*

Screening fatigue yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mengacu pada DNV RP F105. Kriteria *screening* adalah meninjau terjadinya *fatigue* akibat VIV yang disebabkan oleh beban gelombang secara langsung dan kombinasi beban arus & gelombang secara bersamaan. Kriteria *fatigue* ini telah dikalibrasikan dengan analisis *fatigue* lengkap untuk memastikan usia *fatigue* lebih dari 50 tahun.

Di dalam DNV RP F105 (2006), evaluasi bentangan bebas pipa bawah laut dijelaskan di dalam Persamaan *screening criteria* berikut :

- Untuk arah *in-line* harus memenuhi :

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100\text{tahun}}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\alpha}} \quad (2.61)$$

$f_{n,IL}$ = Frekuensi natural *in-line*

γ_{IL} = *Safety factor (in-line)*

$U_{c,100 \text{ tahun}}$ = Periode ulang 100 tahun untuk arus laut

L = Panjang bentangan bebas pipa (m)

$\bar{\alpha}$ = *Current flow ratio*

$$V_{R,onset}^{IL} = \text{In-line onset value}$$

$$= \begin{cases} \left(\frac{1,0}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} < 0,4 \\ \left(\frac{0,6+K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } 0,4 < K_{sd} < 1,6 \\ \left(\frac{2,2}{\gamma_{on,IL}} \right) & \text{untuk } K_{sd} > 1,6 \end{cases} \quad (2.62)$$

$\gamma_{on,IL}$ = Safety factor untuk in-line onset value

K_{sd} = Stability parameter / γ_k (safety factor)

- Untuk arah *cross-flow* harus memenuhi

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t} \quad (2.63)$$

$f_{n,CF}$ = Frekuensi natural *cross flow*

γ_{CF} = Safety factor (*cross flow*)

$U_{w,1tahun}$ = Periode ulang 100 tahun untuk arus laut

$V_{R,onset}^{CF}$ = Cross-flow onset value

$$= \left(\frac{3 \cdot \psi_{proxi,onset} \cdot \psi_{trench,onset}}{\gamma_{on,CF}} \right) \quad (2.64)$$

$\psi_{proxi,onset}$ =Faktor koreksi untuk *cross flow* dekat seabed

$\psi_{trench,onset}$ = Reduction factor untuk *cross flow* karena pengaruh trench

$\gamma_{on,CF}$ = Safety factor untuk *cross flow* onset value

2.2.14 Tegangan Pada Pipa

Untuk mengetahui kondisi batas kelayakan operasi pada suatu sistem pipa bawah laut diperlukan analisis tegangan pipa. Pada perhitungan ini menggunakan ketentuan yang divalidasi terhadap aturan yang ada dalam *code* desain pipa yang digunakan.

Beban yang bekerja pada pipa bawah laut (*offshore pipeline*) akan menyebabkan timbulnya tegangan di dinding pipa. Kombinasi tegangan – tegangan yang bekerja pada dinding pipa menyebabkan regangan atau defleksi.

Berdasarkan ASME B31.8 : (*Gas Transmission and Distributing Piping System*) memberikan batasan-batasan pada tegangan yang terjadi pipa penyalur gas dengan menggunakan konsep *allowable stress design*. Berdasarkan kode ini, tegangan yang diizinkan terjadi pada pipa penyalur gas ditampilkan pada Tabel 2.9 berikut :

Tabel 2. 9 Tegangan Izin pada Pipa Menurut ASME B31.8

<i>Design Calculation</i>	<i>Allowable Stress</i>		
	<i>Hoop Stress</i>	<i>Longitudinal Stress</i>	<i>Combined Stress</i>
<i>Operation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS
<i>Hydrotest</i>	90% SMYS	-	96% SMYS
<i>Installation</i>	72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

(Sumber : ASME B31.8, 2012)

2.2.14.1 Tegangan *Hoop*

Tegangan *hoop* merupakan tegangan yang bekerja pada dinding pipa akibat adanya pengaruh tekanan dari sisi luar dan dalam pipa. Tegangan ini bekerja pada arah *tangensial* atau *circumferential* (Guo dkk., 2014). ASME B31.8 merumuskan Persamaan tegangan pada Persamaan 2.65 dan 2.66 berikut :

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D_o}{2t} \quad \text{untuk } \frac{D}{t} \geq 30 \quad (2.65)$$

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D_o - t}{2t} \quad \text{untuk } \frac{D}{t} < 30 \quad (2.66)$$

σ_h = tegangan *hoop* (MPa)

p_i = tekanan desain internal pipa (MPa)

p_e = tekanan ekstenal (MPa)

2.2.14.2 Tegangan Longitudinal

Menurut Bai dan Bai, 2014, tegangan longitudinal merupakan tegangan aksial yang berkerja pada dinding pipa. Menurut ASME B31.8 Komponen utama tegangan longitudinal adalah tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Persamaan tegangan longitudinal adalah sebagai berikut :

$$\sigma_L = \sigma_a + \sigma_b \text{ atau } \sigma_a - \sigma_b \quad (2.67)$$

- σ_L = tegangan longitudinal (MPa)
 σ_a = tegangan aksial kombinasi (MPa)
 σ_b = tegangan *bending* (MPa)

Tegangan aksial kombinasi dipengaruhi oleh keadaan *restrained/unrestrained* pipa. Untuk pipa yang mengalami bentangan bebas, pipa dapat dianggap dalam kondisi *restrained* karena terdapat asumsi tumpuan pada bentangan bebas. Tumpuan pipa dapat menahan gerakan aksial, gerakan lateral maupun rotasi pipa yang dapat mempengaruhi tegangan pipa akibat tekanan dan temperatur pipa. Menurut ASME B31.8, tegangan aksial kombinasi dijelaskan di dalam Persamaan 2.64 dan 2.65 berikut :

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + v_{st}\sigma_h + \sigma_t \quad (2.68)$$

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} + v_{st}\sigma_h + E_{st}\alpha_e(T_1 - T_2) \quad (2.69)$$

- σ_{a0} = tegangan aksial (MPa)
 F_a = gaya aksial (N)
 σ_t = tegangan *thermal* (°C)
 T_1 = temperatur pipa saat instalasi (°C)
 T_2 = temperatur pipa saat operasi (°C)
 v_{st} = *poisson ratio* pipa baja

Tegangan *bending* diakibatkan oleh momen yang terjadi pada bentangan bebas karena beban struktur pipa dan beban hidrodinamis. Persamaan tegangan *bending* dijelaskan pada Persamaan 2.66 berikut :

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{z} \quad (2.70)$$

- M_i = *in-plane bending moment* (N.m)
 M_o = *out-plane bending moment* (N.m)
 i_i = *in-plane stress intensification factor*
 i_o = *out-plane intensification factor*
 z_A = modulus penampang pipa (cm³)

2.2.14.3 Tegangan Ekuivalen (*Von Mises*)

Tegangan ekuivalen atau *von mises* merupakan resultan dari seluruh tegangan yang terjadi pada pipa. Persamaan tegangan ekuivalen (*von mises*) ditampilkan pada Persamaan 2.71 berikut :

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_L \sigma_h + 3\tau^2} \quad (2.71)$$

τ = tegangan torsional (MPa)

Tegangan torsional biasanya relative kecil dibandingkan dengan tegangan – tegangan lain yang bekerja sehingga dapat diabaikan dalam analisis. Untuk kasus bentangan bebas pipa bawah laut dapat diabaikan sehingga nilainya adalah 0 (Bai dan Bai, 2014).

2.2.15 Perkiraan Umur Kelelahan Pipa

Fatigue life atau sisa waktu operasi merupakan jumlah siklus kelelahan yang terjadi pada suatu struktur hingga menyebabkan terjadinya kegagalan pada suatu struktur tersebut. Seperti yang telah dijelaskan pada DNV-RP- C 203 yaitu dimana dalam melakukan perhitungan *fatigue life*, menggunakan pendekatan kurva S-N dengan dengan metode *Palmgreen-Miner Rule*. Berikut ini ada beberapa faktor yang mempengaruhi sisa umur operasi (*fatigue life*) yaitu diantara : mikrostruktur dari material (bentuk dan ukuran kepadatan material), proses yang terjadi pada struktur pipa tersebut (riwayat deformasi, produk pabrik), beban spectrum, kondisi lingkungan (suhu, tingkat korosifitas) serta geometri dari komponen (bentuk las-lasan, besarnya sudut dan ketebalan).

Komponen-komponen dasar dari analisa umur kelelahan (*fatigue life*) sebagai berikut :

1. Karakteristik siklus beban yang terjadi baik untuk kurun waktu pendek maupun kurun waktu panjang.
2. Perhitungan beban-beban siklus yang mengenai struktur.
3. Evaluasi siklus rentang tegangan pada suatu elemen yang ditinjau.

4. Perhitungan kerusakan pada elemen yang ditinjau akibat siklus rentang tegangan yang terjadi.
5. Evaluasi kekuatan elemen yang ditinjau.

Dalam desain suatu struktur pada kasus pipa bawah laut, salah satu kriteria persyaratan desainnya adalah memiliki waktu operasi yang tak terhingga waktunya untuk dapat bertahan karena adanya kegagalan akibat kelelahan pada pipa. Hal ini disebabkan karena dengan adanya persyaratan tersebut diharapkan struktur dari suatu pipa dapat memiliki tingkat maksimal *stress* yang melebihi ketahanan material dari pipa tersebut. Sehingga jika pipa mendapatkan tekanan baik itu dari dalam dan dari luar yang pada akhirnya menyebabkan pipa mengalami kelelahan, struktur material dari pipa tersebut masih mampu dalam menahan tingkat kelelahan yang terjadi atau dengan kata lain tidak terjadi kegagalan pada pipa tersebut.

2.2.15.1 Penentuan Nilai Siklus Kelelahan dengan Pendekatan Palmgreen-Miner Rule

Berdasarkan DNV RP C203 untuk menentukan sisa waktu operasi harus mencari terlebih dahulu tingkat kelelahan dengan Persamaan 2.72 :

$$D_{fat} = \sum \frac{n}{N} \quad (2.72)$$

Dimana,

D_{fat} : Accumulated fatigue damage

n : Total number of stress cycles corresponding to the stress range

N : Number cycles to failure at stress range

Untuk mendapatkan besarnya nilai *n* dan *N* maka diperlukan kurva S-N. Perhitungan umur kelelahan ini mengacu pada DNV RP F 105 dan DNV RP C203. Melalui proses pemilihan jenis kurvanya dan kategori kurva S-N, maka nilai *N* dapat diperoleh melalui persamaan 2.73 berikut ini (DNV RP-C 203) :

$$\text{Log } N = \log a - m \log S_i \quad (2.73)$$

Dimana,

S_i : *stress range*

a : *intercept of the design S-N Curve with the log N axis*

m : *negative inverse slope oh the S-N Curve*

Pada kasus Tugas Akhir ini, *stress range* menggunakan metode perhitungan *response model* yang mengacu pada Code DNV RP F-105. Dalam acuan tersebut terdapat *stress range* yang berasal dari getaran arah *inline* dan *crossflow*. Berikut ini Persamaan 2.74 dan 2.74 yang digunakan dalam menghitung *stress range* pipa bawah laut :

$$S_{iL} = 2 \cdot A_{iL} \cdot \left(\frac{A_y}{D_{tot}} \right) \psi_{\alpha, iL} \gamma_{iL} \quad (2.74)$$

Dimana,

S_{iL} : *stress range* pada arah *in-line* VIV (N/m²)

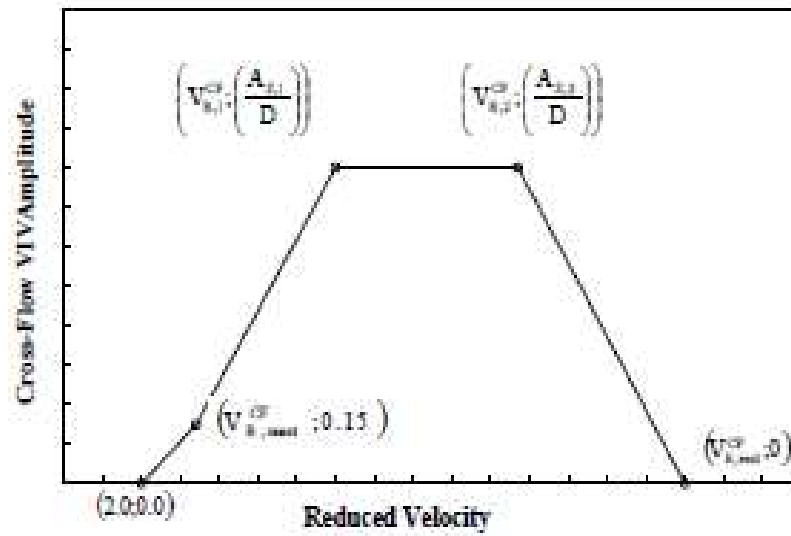
A_{iL} : *unit stress amplitude*, tegangann yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *in-line* (N/m²)

$\frac{A_y}{D_{tot}}$: Amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *in-line* VIV.

Dapat diperoleh dari Gambar 2.5

$\psi_{\alpha, iL}$: Faktor koreksi rasio kecepatan aliran arus.

γ_{iL} : Faktor keamanan untuk *in-line* VIV



Gambar 2. 5 Respon Amplitudo *In-line* VIV, V_R , K_{sd}

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot \left(\frac{A_z}{D_{tot}}\right) R_k \gamma_s \quad (2.75)$$

Dimana,

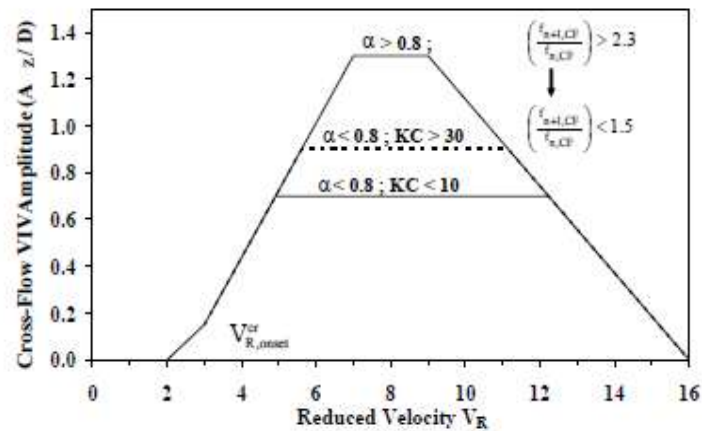
S_{CF} : *stress range* pada arah *cross-flow* VIV (N/m^2)

A_{il} : *unit stress amplitude*, tegangann yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *cross-flow* (N/m^2)

R_k : Faktor reduksi amplitude akibat adanya *damping* / redaman

γ_s : Faktor keamanan untuk *range* tegangan

$\frac{A_z}{D}$: Amplitudo vibrasi pada arah *cross-flow* VIV. Dapat diperoleh dari Gambar 2.6



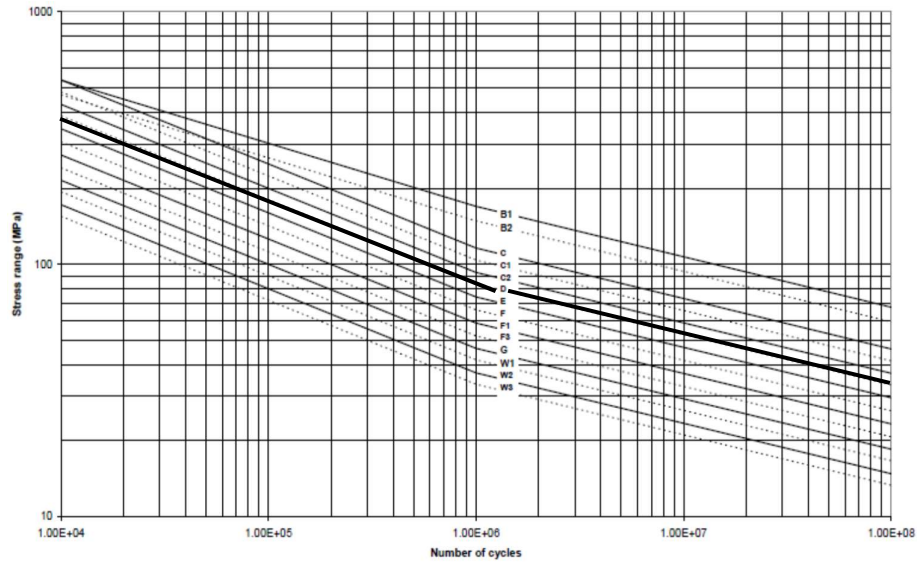
Gambar 2. 6 Respon Amplitudo *Cross-Flow* VIV, V_R , K_{sd}

Nilai n dapat ditentukan dengan menggunakan grafik pada Gambar 2.7 sesuai nilai *stress range*. Probabilitas kejadian siklus tegangan pada nilai n berkisar 2 % -10%. Kurva S-N yang digunakan seperti pada Gambar 2.7, mengacu pada *Figure 2-5 DNV RP C203 Fatigue Strength of Offshore Steel Structure* yaitu kategori D. Pemilihan kurva harus didasarkan ciri-ciri struktur yang dianalisa. Berikut pemilihan jenis kurva S-N dan *plotting* tegangan dalam grafik kurva S-N dalam menentukan jumlah tegangan lelah yang terjadi di struktur tersebut dijelaskan oleh Tabel 2.10 dan Gambar 2.7

Tabel 2. 10 Tabel *S-N Curve* di *Seawater* dengan *Cathodic Protection*
(DNV RP C203, 2005)

S-N curve	$N \leq 10^6$ cycles		$N > 10^6$ cycles	Fatigue limit at 10^7 cycles ^{*)}	Thickness exponent k	Stress concentration in the S-N detail as derived by the hot spot method
	m_1	$\log \bar{\sigma}_1$	$\log \bar{\sigma}_2$ $m_2 = 5.0$			
B1	4.0	14.917	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.685	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.192	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.049	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	11.901	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	11.764	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	11.610	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.455	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.299	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.146	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	10.998	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	10.861	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	10.707	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.570	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	11.764	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

^{*)} see also 2.10



Gambar 2. 7 Plotting Stress S-N Curve di Seawater (DNV RP C203,

Pada perhitungan estimasi sisa waktu operasi harus di cari terlebih dahulu nilai rasio kelelahan kerusakan. Oleh sebab itu, dalam penentuan rasio *fatigue damage* atau rasio kelelahan kerusakan, semua komponen yang berasal dari sumber lainnya perlu dihitung lebih lanjut. Komponen tersebut meliputi adanya penambahan *safety factor* dan rasio *damage*.

Penentuan jenis kurva S-N seperti pada Gambar 2.7 berdasarkan pada struktur yang digunakan. Di dalam *code* tersebut terdapat penjelasan mengenai kriteria strukur dengan jenis kurva S-N yang sesuai. Maka dari itu, perlunya penyesuaian kurva-SN untuk mendapatkan grafik yang benar agar mendapatkan nilai jumlah siklus menuju gagal pada saat *stress range*.

2.2.15.2 Perkiraan Sisa Waktu Operasi Pipa

Dalam melakukan perhitungan perkiraan sisa waktu operasi, dapat menggunakan perhitungan dengan berdasarkan persamaan yang telah ditentukan pada kode standar DNV RP F-105 sebagai berikut :

$$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D_{fat,f105}} \times \eta \quad (2.76)$$

Keterangan :

T_{life} : Sisa waktu operasi

T_{exp} : Waktu pipa yang sudah beroperasi

η : *Safety factor*

Perhitungan akumulasi *fatigue damage* dari kode standar DNV RP C203 berbeda parameter dengan perhitungan yang terdapat pada DNV RP F105. Maka dari itu perlu konversi akumulasi *fatigue damage*. Berikut persamaan yang digunakan dalam menyamakan hubungan akumulasi *fatigue damage*,

$$D_{fat,f105} = \frac{D_{fat}}{\alpha_{fat}} \times \eta \quad (2.77)$$

Dimana, α_{fat} : *allowable damage ratio for fatigue*

Penentuan parameter *allowable damage ratio for fatigue* dapat menggunakan Tabel 2.10.

Tabel 2. 11 *Allowable Damage Ratio for Fatigue*

<i>Safety class</i>	<i>Low</i>	<i>Medium</i>	<i>High</i>
α_{fat}	1/3	1/5	1/10

BAB III

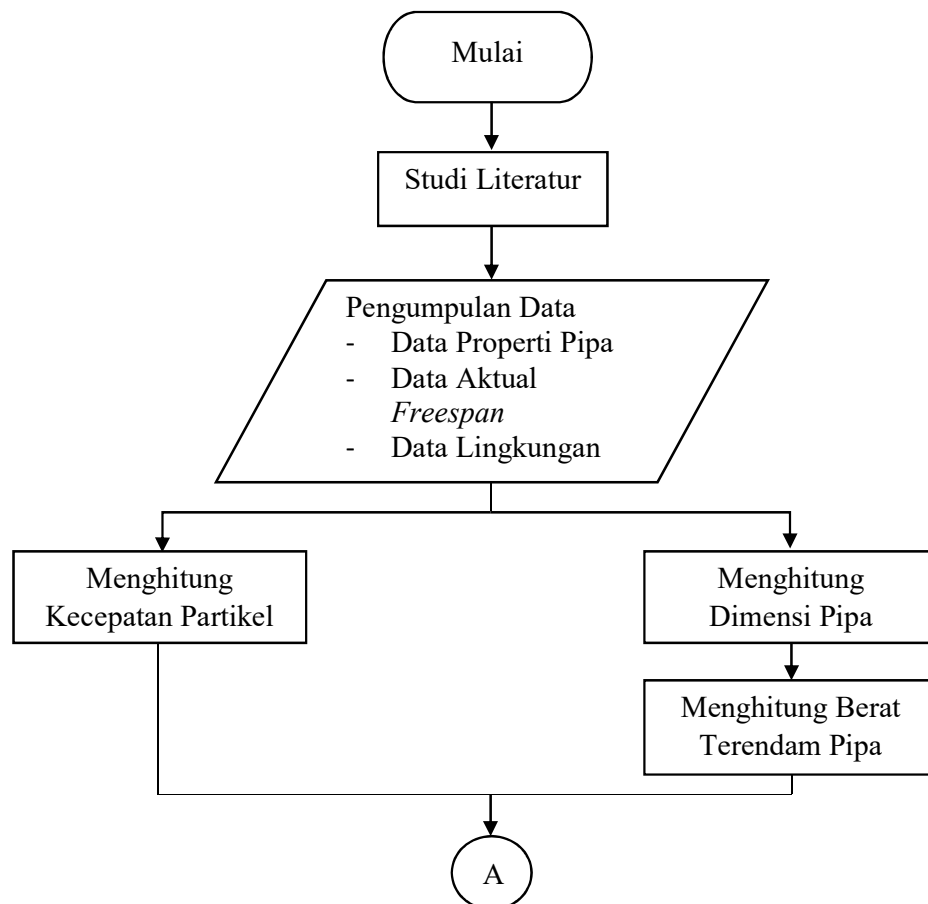
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

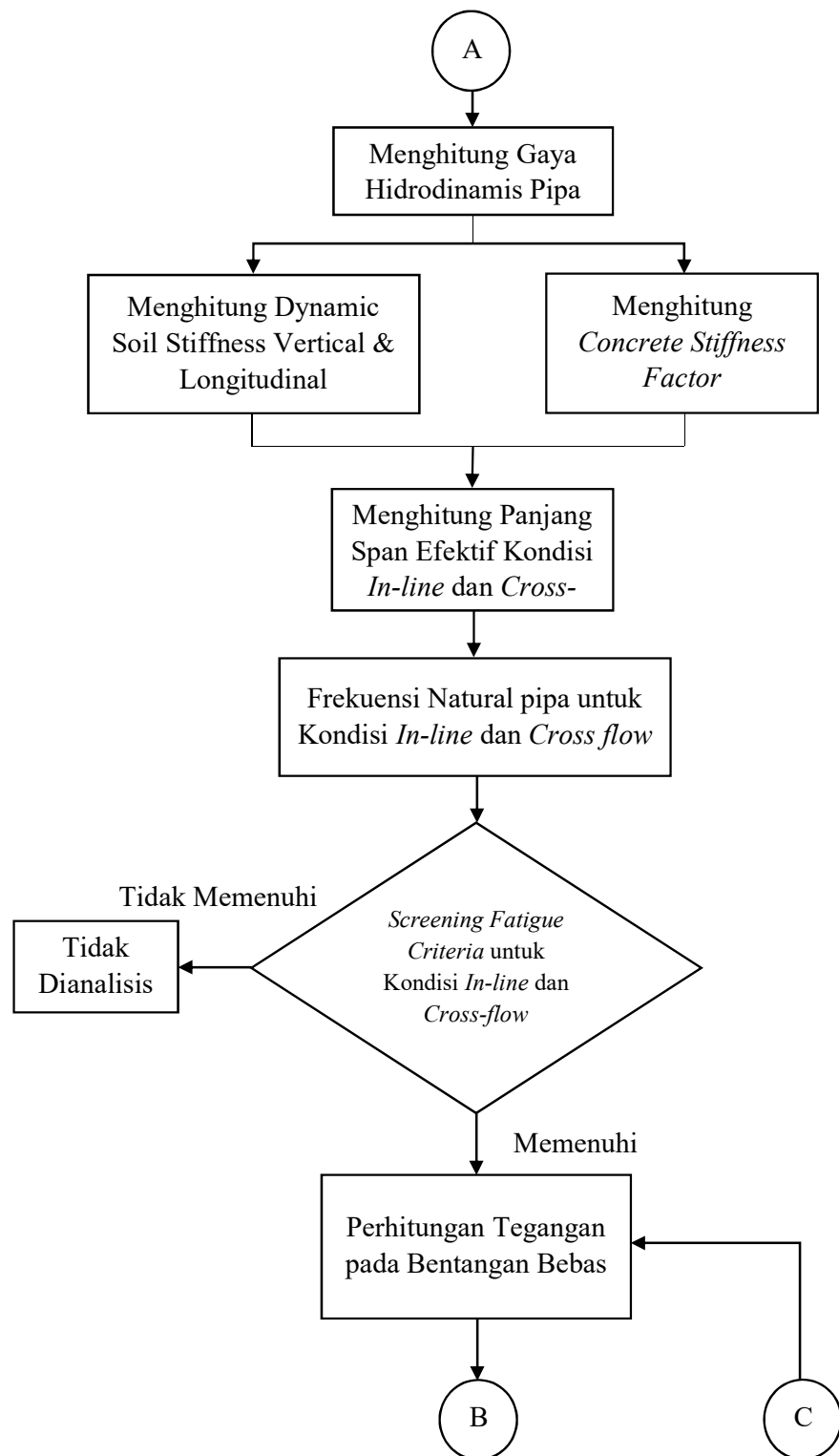
Proses pengerjaan Tugas Akhir ini menggunakan metode penelitian guna mencapai penyelesaian masalah dan memperoleh hasil yang baik dan sesuai. Metodologi penelitian merupakan suatu proses penentuan tahap – tahap dalam menentukan kegiatan yang dikerjakan, perhitungan dari awal hingga analisis yang dikerjakan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini. Pengerjaan tugas akhir ini dijelaskan secara bertahap di dalam diagram alir dan prosedur penelitian.

3.1.1 Diagram Alir (*Flowchart*)

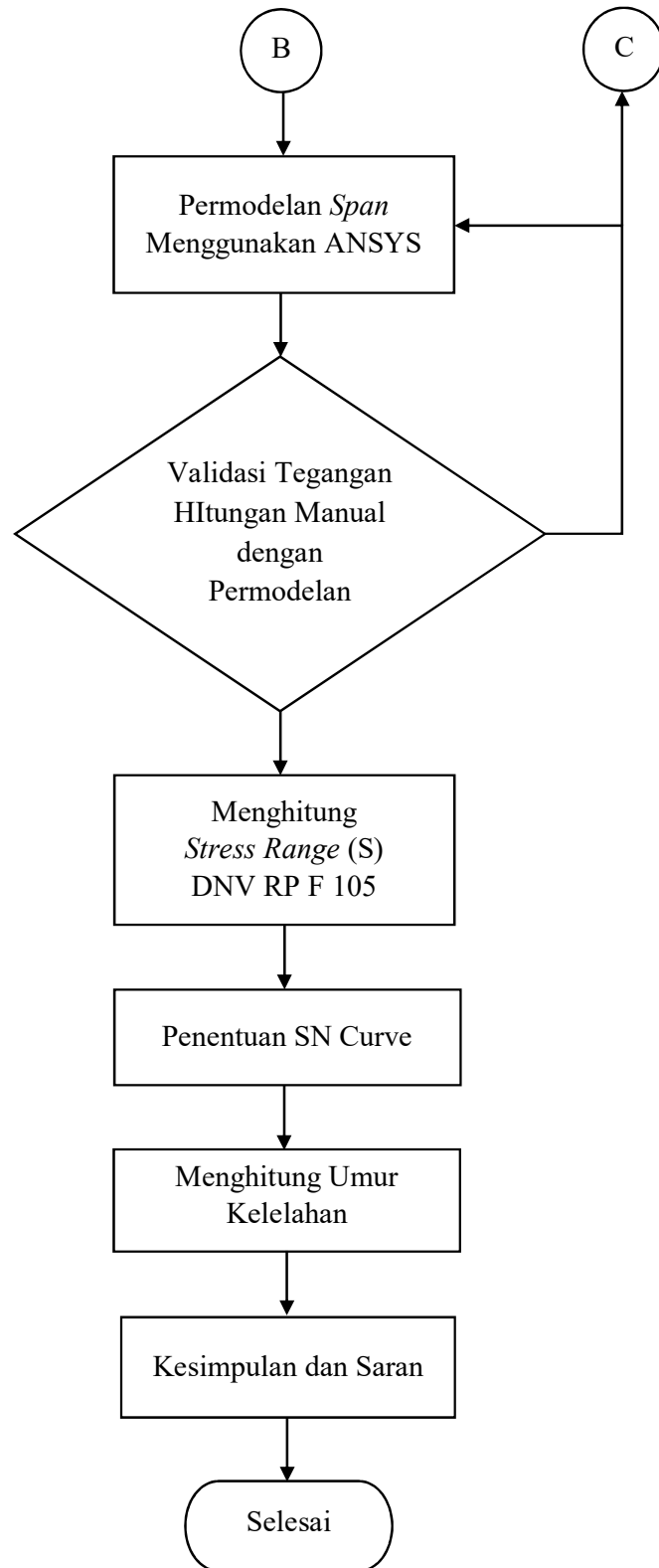
Metodologi penelitian tugas akhir dijelaskan dalam diagram alir pada Gambar 3.1 :



Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)



Gambar 3. 1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya diselesaikan dengan mengacu pada diagram alir. Diagram alir yang telah dibuat sebelumnya merupakan alur dari prosedur tugas akhir ini. Berikut penjelasan prosedur tugas akhir pada diagram alir:

1. Studi Literatur

Hal pertama yang dilakukan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini adalah mengumpulkan literatur yang berasal dari buku, jurnal penelitian, laporan tugas akhir dan *codes*. Literatur yang digunakan sebagai referensi mempunyai keterkaitan dengan teori pipa bawah laut, analisis bentangan bebas dan analisis kelelahan pada pipa. *Codes* yang digunakan adalah DNV RF F 105 & DNV RP C203 yang berhubungan dengan *fre spans* dan analisis *fatigue*. Dan ASME B31.8 untuk analisis tegangan pada pipa gas.

2. Pengumpulan Data

Tahap berikutnya adalah proses pengumpulan data *pipeline* berupa tabulasi *fre spans* hasil survei di lapangan, data property pipa, data lingkungan (*metocean*) dan data tanah di lokasi pipa beroperasi. Data yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan data 18" *Export Pipeline* milik Kangean Energy Indonesia yang terletak di Lapangan Gas Terang Sirasun Batur. Pipa menyalurkan gas dari *subsea river base* dari FPU menuju *Hot-tap Point East Java Gas Pipeline*.

3. Perhitungan Dimensi dan Berat Terendam Pipa

Selanjutnya dilakukan perhitungan dimensi pipa. Dimensi pipa yang dihitung seperti tebal dinding pipa, diameter total pipa, diameter dalam pipa, diameter *concrete*, diameter *corrosion coating*, momen inersia pipa, momen inersia *concrete*, dan luas penampang pipa. Kemudian dilakukan perhitungan massa efektif pipa yang merupakan total dari komponen massa seperti massa struktur pipa, massa konten pipa dan massa tambah pipa.

Berat terendam pipa dapat diperoleh dengan menjumlahkan berat seluruh struktur pipa dengan gaya apung pipa di dalam air. Berat seluruh struktur pipa dapat diperoleh dari massa seluruh struktur pipa (termasuk konten dan *coating*) dikalikan dengan gaya gravitasi. Sedangkan gaya apung dapat diperoleh dari massa air yang dipindahkan akibat pencelupan pipa di dalam air dikalikan dengan gaya gravitasi.

4. Perhitungan Kecepatan Partikel Air di Lokasi Pipa

Data *metocean* (arus dan gelombang) harus diolah terlebih dahulu untuk mendapatkan kecepatan partikel air di lokasi pipa. Kecepatan partikel air muncul akibat efek arus, gelombang, maupun kombinasi arus dan gelombang. Untuk gelombang, perlu dilakukan analisis spectra untuk gelombang acak. Untuk efek arus, kecepatan partikel air yang diukur pada elevasi tertentu harus ditransformasi terlebih dahulu menjadi kecepatan arus dasar laut di lokasi peletakan pipa.

5. Perhitungan Gaya Hidrodinamis di Lokasi Pipa

Gaya hidrodinamis yang terjadi pada pipa muncul akibat interaksi antara pipa dengan aliran air laut di sekitar pipa. Gaya hidrodinamis yang terjadi pada bentangan bebas pipa adalah gaya *drag* dan gaya inersia. Gaya- gaya ini dapat mempengaruhi kestabilan pipa terutama defleksi yang terjadi pada pipa.

6. Perhitungan *Dynamic Soil Stiffness* dan *Concrete Stiffness Factor*

Dynamic soil stiffness merupakan kekakuan dinamis yang muncul akibat interaksi pipa dengan tanah. Sedangkan *concrete stiffness factor* merupakan faktor yang menambahkan kekakuan pipa akibat penambahan selimut beton. Keduanya dapat mempengaruhi dalam menentukan nilai β (*relative soil stiffness parameter*) yang merupakan parameter panjang efektif *freespan*.

7. Perhitungan Panjang Bentangan Bebas Efektif

Panjang bentangan bebas efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F105. Panjang bentangan bebas efektif dapat mempengaruhi defleksi statis, *critical buckling load* dan frekuensi natural pipa. Panjang bentangan bebas efektif ini akan dihitung untuk arah *in-line* dan *cross-flow* pipa.

8. Perhitungan Frekuensi Natural

Perhitungan frekuensi natural pipa memerlukan beberapa parameter yang terlebih dahulu dihitung besarannya. Beberapa diantaranya adalah *effective axial load*, defleksi statis dan *critical buckling load*. Ketiga parameter ini mempengaruhi besar frekuensi natural yang dimiliki oleh pipa. Persamaan untuk menghitung ketiga parameter ini terdapat di DNV RP F105. Selain ketiga parameter yang disebutkan di atas, perhitungan frekuensi natural pipa juga memerlukan parameter CSF dari panjang bentangan bebas efektif yang telah dihitung sebelumnya.

9. Screening Fatigue Criteria

Frekuensi natural yang telah didapat kemudian di *screening* menggunakan kriteria yang ditentukan di dalam DNV RP F-105. *Screening* dilakukan untuk memeriksa panjang bentangan bebas pipa mana saja yang perlu dilakukan perhitungan umur kelelahan akibat *Vortex Induced Vibration*. Pada *Screening Fatigue Criteria*, Frekuensi natural pipa dibandingkan dengan frekuensi *vortex shedding*. Selain membutuhkan frekuensi natural, parameter lain yang dibutuhkan untuk proses *screening* adalah *reduced velocity* dan *current flow ratio*. *Span* yang memenuhi kriteria *screening* akan dilakukan perhitungan *fatigue life* nya, sedangkan yang tidak memenuhi tidak dianalisis

10. Perhitungan Tegangan pada Bentangan Bebas Pipa

Setelah *screening* panjang bentangan yang memenuhi kriteria dihitung tegangan yang terjadi di bentangan tersebut. Tegangan – tegangan ini kemudian di validasi dengan kriteria *allowable stress design* ASME B31.8

11. Perhitungan *Stress Range* (S)

Stress range dapat dihitung menggunakan persamaan yang terdapat pada DNV RP F-105. Penggolongan *stress range* pada *codes* dibagi menjadi 2. *Stress range* untuk arah *in-line* dan *stress range* untuk arah *cross-flow*.

12. Penentuan Kurva S-N

Selanjutnya penentuan kurva S-N diperlukan untuk mengetahui berapa siklus yang dibutuhkan pipa tersebut untuk terjadi kegagalan pada rentang tegangan yang ditentukan (N). Untuk melengkapi penjelasan mengenai kurva S-N dalam DNV RP F105, direkomendasikan DNV RP C-203 mengenai “*Fatigue Design of Offshore Steel Structures*” sehingga pada tugas akhir ini Kurva S-N yang dipakai dalam perhitungan adalah kurva berdasarkan DNV RP C-203. Dari kurva diperoleh nilai konstanta kekuatan karakteristik *fatigue* dan nilai slope negative inverse (*m*).

13. Perhitungan *Damage & Umur Kelelahan*

Langkah terakhir adalah menghitung *fatigue damage* dari *stress range* & umur kelelahan pada pipa menggunakan teori *cumulative damage* / akumulasi kerusakan (Hukum Palmgren-Miner). Perhitungan dilakukan secara manual berdasarkan pada ketentuan yang ada pada DNV RP F-105.

14. Permodelan Pipa Menggunakan ANSYS

Dalam memeriksa tegangan pada bentangan bebas pipa, dilakukan permodelan dengan menggunakan *software finite element method*. Tegangan dari hitungan manual & permodelan pada *Software* kemudian dibandingkan.

BAB IV

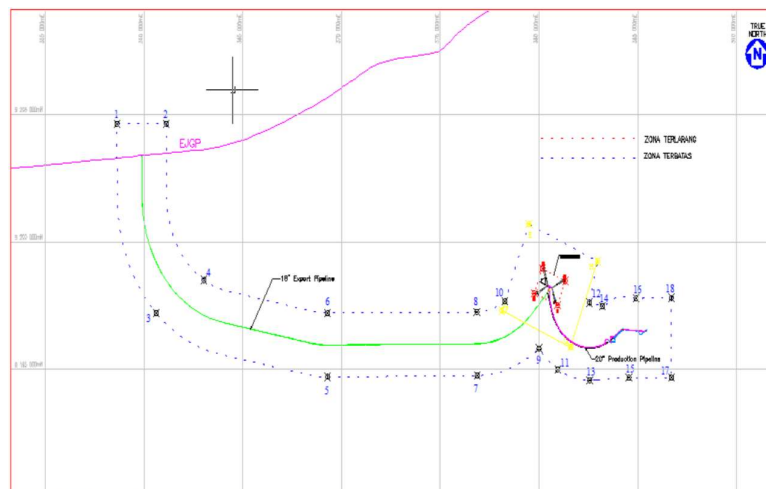
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Data – data yang dipakai dalam Tugas Akhir ini menggunakan studi kasus *Export Pipeline* milik Kangean Energy Indonesia. *Pipeline* tersebut mendistribusikan gas dari Terang Sirasun Batur *Field* menuju *Tie-in East Java Gas Pipeline*. Jalur *Pipeline* memiliki ukuran panjang sekitar 25,69 km. Berikut gambar lokasi *Pipeline* yang ditinjau ditampilkan pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2



Gambar 4. 1 Lokasi *Field* Terang Sirasun Batur



Gambar 4. 2 Lokasi 18" *Export Pipeline*

Studi kasus yang diangkat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu terdapatnya beberapa segmen pipa yang mengalami bentangan bebas di jalur *pipeline* yang dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Inspeksi *span* ini dilakukan dengan survei jalur pipa pada tahun 2013. Dari hasil survei tersebut didapatkan informasi mengenai lokasi segmen pipa dengan data petunjuk panjang dan kedalaman *span*. Sehingga perlu dilakukan analisis bentangan bebas untuk mengetahui panjang bentangan bebas yang masih diizinkan terjadi pada pipa dan berapa umur sisa dari segmen pipa yang mengalami bentangan bebas. Studi kasus ini membutuhkan data – data di antaranya adalah data desain dan operasional pipa, data lingkungan, data karakteristik tanah di lokasi pipa dan data hasil survei bentangan bebas yang telah dilakukan.

4.1.1 Data Desain

a. Data Desain Pipa

Berikut data desain pipa dari 18” *Export Pipeline* milik Kangean Energy Indonesia ditampilkan pada Tabel 4.1 berikut

Tabel 4. 1 Data Desain Pipa

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang	25.693	m
Diameter Luar Pipa (OD)	457,2	mm
Tebal Dinding Pipa	12,7	mm
<i>Corrossion Allowance</i>	2,75	mm
<i>Design Life</i>	20	tahun
Fluida Konten	Gas	-
Densitas Fluida	60	Kg/m ³
<i>Flowrate</i>	330	MMSCFD

b. Data *Coating* Pipa

Pipa 18’ *Export Pipeline* memiliki dua *coating* yang melapisinya. Berikut data *coating* pipa ditampilkan pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4. 2 Data Anti *Corrosion Coating*

Parameter	Nilai	Satuan
Material	<i>Asphalt Enamel</i>	-
Tebal Anti <i>Corrosion Coating</i>	6	mm
Densitas Anti <i>Corrosion Coating</i>	1.300	Kg/m ³

Tabel 4. 3 Data *Concrete Coating*

Parameter	Nilai	Satuan
Tebal <i>Concrete Coating</i>	40	mm
Densitas <i>Concrete Coating</i>	3.043	Kg/m ³

4.1.2 Data Lingkungan

Data – data lingkungan yang digunakan antara lain adalah data arus serta gelombang dan data karakteristik tanah, data di sekitar perairan Terang, Siraus, Batur *Field* tersebut ditampilkan dalam Tabel 4.4 dan Tabel 4.5

Tabel 4. 4 Data Arus & Gelombang

Data Lingkungan				
Deskripsi	Nilai			Satuan
	1 tahun	10 tahun	100 tahun	
Significant Wave Height, Hs	3.1	4.4	6	m
Significant Wave Period, Ts	5	-	9.2	sec
Peak Period for Design Spectrum, Tp	8.1	10.1	12.4	sec
Current Velocity				
Surface	1.37	1.53	1.7	m/s
Bottom	0.7	0.8	0.9	m/s

Tabel 4. 4 Data Arus & Gelombang (lanjutan)

Data Lingkungan				
Deskripsi	Nilai			Satuan
	1 tahun	10 tahun	100 tahun	
Highest Astronomical Tide (HAT), Above MSL	0.97			m
Lowest Astronomical Tide (LAT), Below MSL	-1.04			m
Seawater Density	1025			kg/m ³
Water Depth	90			m

Tabel 4. 5 Data Karakteristik Tanah

Data Tanah		
Deskripsi	Nilai	Satuan
Jenis Tanah	Fine to medium loose sands	-
Layer thickness	0.5 - 0.8	m
Unit Weight (undrained)	15.6	kN/m ³
Lateral Friction Factor	0.6	

4.1.3 Data *Span* Aktual

Data *Span* Aktual yang digunakan dalam studi kasus di tugas akhir ini merupakan hasil *survey* pada tahun 2013. Berikut data *span* aktual beserta nilai *gap* (jarak dari pipa ke *seabed*) ditampilkan pada Tabel 4.6

Tabel 4. 6 Data *Span* Aktual Hasil *Survey*

No.	KP (km)	Gap (m)	Panjang <i>Span</i> Aktual(m)
1.	1.354 – 1.390	0,1	36
2.	1.524 – 1536	0,2	12
3.	1.584 – 1.620	0,2	36

Tabel 4. 6 Data *Span* Aktual Hasil *Survey* (lanjutan)

No.	KP (km)	Gap (m)	Panjang Span Aktual(m)
4.	1.642 – 1.666	0,25	24
5.	1.700 – 1.724	0,2	24
6.	4.056 – 4.080	0,24	24
7.	4.867 – 4.881	0,3	14
8.	6.378 – 6.393	0,2	15
9.	8.806 – 8.828	1	22
10.	12.588 – 12.595	1	7
11.	15.130 – 15.147	1	17
12.	16.433 – 16.453	0,5	20
13.	16.972 – 16.983	0,3	11
14.	17.046 – 17.080	0,3	34
15.	17.303 – 17.324	0,2	21

4.2 Analisis Dimensi Pipa

4.2.1 Perhitungan Dimensi Pipa

Perhitungan dimensi pipa di sini, dilakukan untuk menghitung diameter pipa ataupun massa total dari pipa itu sendiri. Perhitungan dimensi pipa ini digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan analisis *freespan* selanjutnya, seperti perhitungan panjang efektif *span*, frekuensi natural, dan *screening*. Berikut Tabel 4.7 menampilkan hasil perhitungan dimensi pipa.

Tabel 4. 7 Perhitungan Dimensi Pipa

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter Total Pipa	D_t	0,549	m
Diameter Dalam Pipa	D_i	0,432	m
Diameter Lapisan Anti Korosi	D_{cc}	0,469	m
Diameter Lapisan <i>Concrete</i>	D_{conc}	0,549	m
Luas Internal Pipa	A_i	0,146	m ²
Luas Pipa Lapisan Baja	A_{st}	0,018	m ²

Tabel 4.7 Perhitungan Dimensi Pipa (Lanjutan)

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Luas Pipa Lapisan Anti Korosi	A_{cc}	0,009	m ²
Luas Pipa Lapisan <i>Concrete</i>	A_{conc}	0,064	m ²
Momen Inersia Pipa Baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	I_{conc}	2.09E-03	m ⁴

Hasil perhitungan dimensi pipa akan digunakan dalam proses perhitungan massa efektif yang dijelaskan pada subbab selanjutnya

4.2.2 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Massa efektif pipa adalah jumlah dari massa seluruh struktur pipa ditambah dengan massa fluida yang dialirkan dan massa tambah. Hasil penjumlahan massa struktur pipa dan massa konten pipa ditampilkan dalam Tabel 4.8

Tabel 4. 8 Massa Pipa di Udara

Perhitungan Massa Pipa di Udara		
Parameter	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	8,786	Kg/m
Massa Pipa Baja	139,218	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	11,350	Kg/m
Massa Lapisan <i>Concrete</i>	194,715	Kg/m
Total	354,070	Kg/m

Untuk massa tambah pipa diperlukan variabel koefisien massa tambah yang harus dicari terlebih dahulu. Koefisien massa tambah dapat ditentukan dengan ketentuan yang ada di dalam DNV RP F-105 2006. Nilai koefisien massa tambah, massa tambah dan massa efektif keseluruhannya ditampilkan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Perhitungan Massa Efektif

Perhitungan Massa Efektif						
Panjang Span Aktual	Gap (e)	Rasio e/Dt	Ca	Massa Bouyancy	Massa tambah	Massa Efektif
m	m	-	-	Kg/m	Kg/m	Kg/m
7	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
11	0.3	0.546	1.109	242.815	269.236	623.306
12	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
14	3	5.462	1.000	242.815	242.815	596.885
15	2	3.642	1.000	242.815	242.815	596.885
17	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
20	0.5	0.910	1.000	242.815	242.815	596.885
21	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
22	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
24	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
24	0.2	0.437	1.182	242.815	287.093	641.163
24	0.3	0.455	1.168	242.815	283.703	637.773
34	0.3	0.546	1.109	242.815	269.236	623.306
34	0.3	0.546	1.109	242.815	269.236	658.912
21	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	692.517

4.2.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Analisis berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat yang dihitung adalah berat material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *buoyancy*. Hasil perhitungan berat terendam pipa disajikan dalam Tabel 4.10 berikut

Tabel 4. 10 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Perhitungan Berat Terendam Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	M_{fluida}	8.786	Kg/m
Massa Pipa Baja	M_{st}	139.218	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	M_{cc}	11.350	Kg/m
Massa Lapisan Concrete	M_{conc}	194.715	Kg/m
Massa Struktur Pipa	M_{str}	345.284	Kg/m
Massa Displacement	M_{disp}	242.815	Kg/m
Gaya Apung	F_b	2382.011	N/m
Berat Terendam Pipa	W_{sub}	1091.415	N/m

4.3 Analisis Kecepatan Partikel Air

4.3.1 Perhitungan Kecepatan Arus *Steady* pada Elevasi Pipa

Arus yang dianalisis adalah arus yang arahnya tegak lurus dengan pipa (sudut 90°), karena arah tersebut memiliki pengaruh beban arus yang paling besar dibandingkan dengan arah yang lain. Aliran arus yang digunakan pada penelitian ini adalah *inner zone*. Zona ini memiliki nilai kelajuan arus rata – rata yang berbeda searah dengan arah horizontal dan kecepatan arus beserta arahnya merupakan fungsi dari geometri dasar laut.

Hal yang harus dipertimbangkan dalam menghitung kecepatan arus yang bekerja pada pipa adalah kekasaran dasar laut (z_o) karena letak pipa dekat dengan dasar laut dan gap (e) karena pipa meletak pada dasar laut dengan kondisi *freespan*. Nilai kekasaran dasar laut disesuaikan dengan jenis tanah pada posisi pipa meletak. Hasil perhitungan kecepatan arus yang bekerja pada pipa disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Perhitungan Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa

Perhitungan Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa									
Panjang Span Aktual	Gap	kecepatan arus pada ketinggian refrensi, 1 tahun U(zr)	kecepatan arus pada di ketinggian refrensi, 100 tahun U(zr)	faktor reduksi	Elevasi diatas dasar laut	parameter kekasaran dasar laut	tinggi refrensi	Kecepatan Arus	
								1 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	-	m	m	m	m/s	m/s
7	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
12	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
36	0.1	0.7	0.9	1	0.375	4.00E-06	1	0.645	0.829
14	3	0.7	0.9	1	3.275	4.00E-06	1	0.767	0.986
15	2	0.7	0.9	1	2.275	4.00E-06	1	0.746	0.960
17	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
22	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
36	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
24	0.25	0.7	0.9	1	0.525	4.00E-06	1	0.664	0.853
24	0.24	0.7	0.9	1	0.515	4.00E-06	1	0.663	0.852
21	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
20	0.5	0.7	0.9	1	0.775	4.00E-06	1	0.686	0.882
11	0.3	0.7	0.9	1	0.575	4.00E-06	1	0.669	0.860
34	0.3	0.7	0.9	1	0.575	4.00E-06	1	0.669	0.860
24	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846

4.3.2 Perhitungan Kecepatan Arus akibat Gelombang pada Elevasi Pipa

Kecepatan arus yang terletak di elevasi pipa dapat bertambah besar karena adanya pengaruh aksi gelombang di permukaan laut. Kecepatan arus akibat gelombang dapat dicari dengan mengolah data gelombang menggunakan spectrum gelombang. Spektrum gelombang yang digunakan adalah spectrum JONSWAP. Karena pipa yang di analisis di dalam tugas akhir ini terletak di perairan Indonesia yang merupakan perairan tertutup (kepulauan)

Data gelombang yang digunakan dalam perhitungan kecepatan arus akibat gelombang dijelaskan pada Tabel 4.12

Tabel 4. 12 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	90		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3.1	6	s
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5	9.2	s

Data di atas kemudian diolah untuk mencari parameter parameter spektrum JONSWAP yaitu periode puncak gelombang, frekuensi puncak gelombang, fungsi distribusi, *peakedness parameter* dan konstanta *generalized Philips* ditampilkan pada Tabel 4.13

Tabel 4. 13 Parameter Spektrum JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3.1	6	m
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5	9.2	s
Frekuensi Gelombang Signifikan	ω_s	1.257	0.683	s
Percepatan Gravitasi	g	9.81		m/s
Periode Puncak Gelombang	T_p	8.10	12.40	s
Frekuensi Puncak Gelombang	ω_p	0.78	0.51	rad/s
Fungsi Distribusi	φ	4.600	5.062	-
<i>peakedness parameter</i>	γ	1.00	1.00	-
<i>konstanta generalised philips</i>	α	0.01130	0.00771	-

Langkah selanjutnya adalah menentukan angka gelombang, Angka gelombang merupakan salah satu variable yang digunakan untuk mentransformasi gelombang permukaan ke gelombang di elevasi pipa. Angka gelombang diperoleh dengan iterasi. Berikut hasil angka gelombang ditampilkan pada Tabel 4.14

Tabel 4. 14 Hasil Angka Gelombang

Angka Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Angka gelombang	k	0.161	0.048	-

Setelah angka gelombang diperoleh, selanjutnya adalah menghitung spektrum gelombang dan transformasi gelombang. Kemudian menentukan momen spektrum dengan metode *Simpson 1..*

Setelah momen spektrum ditentukan, kecepatan arus signifikan normal pada elevasi pipa dapat ditentukan. Kemudian kecepatan arus signifikan normal pada elevasi pipa diolah menggunakan persamaan untuk mempertimbangkan efek arah datang arus dan sebaran gelombang, Terdapat variable *reduction factor* pada persamaan yang dapat ditentukan menggunakan grafik. Untuk nilai kecepatan arus signifikan normal pada pipa untuk setiap gap dicantumkan dalam lampiran. Berikut hasil kecepatan arus signifikan normal pada pipa untuk gap 0,1 dijelaskan pada Tabel 4. 15 sebagai berikut :

Tabel 4. 15 Hasil Kecepatan Arus Signifikan Normal pada Pipa

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,1$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>Mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>Reduction factor</i>	R_D	0.95		-
Kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	0.00	0.18	m/s

4.4 Analisis Vortex Induced Vibration (VIV)

Parameter VIV yang digunakan dalam analisis terdiri dari *stability parameter*, *current flow ratio*, bilangan *keulegan carpenter* dan *reduced velocity*. Beberapa parameter awal yang digunakan dalam perhitungan parameter VIV disajikan pada Tabel 4.16 berikut :

Tabel 4. 16 Parameter Awal untuk Perhitungan Parameter VIV

PARAMETER AWAL				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Densitas Air Laut	ρ_w	1025		kg/m ³
<i>Stability parameter safety factor</i>	γ_k	1.3		-
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.01		-
<i>Hidrodynamic damping</i>	ζ_h	0.00		-

Tabel 4. 16 Parameter Awal untuk Perhitungan Parameter VIV (Lanjutan)

PARAMETER AWAL				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.025		-
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D_t	0.549		m
Rasio k/ D_t	k/D_t	0.006		-
frekuensi gelombang signifikan	ω_s	5.00	9.20	rad/s
Viskositas Kinematis Air Laut	ν_k	1.02E0-6		m ² /s

a. Stability Parameter

Parameter stabilitas mempengaruhi *reduced velocity* terutama keadaan *in-line*. Parameter ini dipengaruhi oleh massa efektif pipa dan modal *damping*. Modal *damping ratio* terdiri dari *structural damping*, *hydrodynamic damping*, *soil damping* yang disajikan pada Tabel 4.17 sebagai berikut :

Tabel 4. 17 Modal Damping Ratio

Modal Damping Ratio			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Soil damping</i>	ζ_{soil}	0.01	-
<i>Hidrodynamic damping</i>	ζ_h	0.00	-
<i>Structural damping</i>	ζ_{str}	0.025	-

Untuk menambah keamanan, parameter stabilitas yang dipeoleh kemudian dikalikan *safety factor* sebesar 1.3. Hasil *stability parameter* ditampilkan pada Tabel 4.18

b. *Current Flow Ratio*

Parameter *current flow ratio* dapat mempengaruhi bentuk aliran. Parameter ini dapat ditentukan menggunakan persamaan. *Current flow ratio* disajikan di dalam Tabel 4.18

c. Bilangan *Keulegan Carpenter*

Bilangan *keulegan carpenter* merupakan parameter yang dapat menentukan perubahan jenis aliran partikel air (laminar/turbulen) pada silinder di bawah air, bersamaan dengan bilang *Reynold* (Re). Parameter ini dapat ditentukan menggunakan persamaan. Bilangan ini dipengaruhi oleh kecepatan arus, frekuensi gelombang dari diameter silinder atau pipa. Hasil bilangan *keulegan carpenter* disajikan di dalam Tabel 4.18

Tabel 4. 18 Nilai Parameter VIV

Nilai Stability Parameter												
L	e	me	Uc		Uw		KC		α	Re		Ksd
			1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun		1 tahun	100 tahun	
7	1	596.885	0.714	0.918	4.21E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.87E+05	5.93E+05	0.738
11	0.3	623.306	0.658	0.846	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.57E+05	5.55E+05	0.771
12	0.2	656.911	0.645	0.829	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	0.99	3.49E+05	5.45E+05	0.813
14	3	596.885	0.767	0.986	4.29E-03	1.85E-01	0.00156	3.66E-02	1.00	4.15E+05	6.30E+05	0.738
15	2	596.885	0.746	0.960	4.24E-03	1.85E-01	0.00155	3.65E-02	1.00	4.04E+05	6.16E+05	0.738
17	1	596.885	0.714	0.918	4.21E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.87E+05	5.93E+05	0.738
20	0.5	596.885	0.714	0.918	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.87E+05	5.93E+05	0.738
21	0.2	656.911	0.658	0.846	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	1.00	3.57E+05	5.55E+05	0.813
22	1	596.885	0.664	0.853	4.21E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.60E+05	5.59E+05	0.738
24	0.2	656.911	0.663	0.852	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	1.00	3.59E+05	5.58E+05	0.813
24	0.24	641.163	0.658	0.846	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	1.00	3.57E+05	5.55E+05	0.793
24	0.25	637.773	0.686	0.882	5.17E-03	1.84E-01	0.00188	3.65E-02	0.99	3.72E+05	5.74E+05	0.789
34	0.3	623.306	0.669	0.860	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.65E-02	1.00	3.62E+05	5.62E+05	0.771
36	0.1	722.545	0.669	0.860	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	1.00	3.62E+05	5.62E+05	0.894
36	0.2	656.911	0.658	0.846	4.20E-03	1.84E-01	0.00153	3.64E-02	1.00	3.57E+05	5.55E+05	0.813

d. *Reduced Velocity*

- *In-line*

Seperti yang telah di jelaskan, *in-line reduce velocity* dipengaruhi oleh *stability parameter* (K_{sd}). Hasil *in-line reduced velocity* disajikan pada Tabel 4.19

- *Cross-flow*

Cross-flow reduced velocity dipengaruhi oleh factor koreksi karena letak pipa dekat dengan *seabed* dan faktor reduksi karena pengaruh *trench*. *Cross-flow reduced velocity* dapat diperoleh menggunakan persamaan. Hasil *cross-flow reduced velocity* disajikan pada Tabel 4.19

Tabel 4. 19 *In- line & Cross-Flow Reduced Velocity*

<i>In-Line Reduced Velocity</i>		<i>Cross- flow Reducity Velocity</i>			
k_{sd}	$V_{R^{IL}}_{onset}$	Rasio e/dt	$\Psi_{prox, onset}$	$\Psi_{trench, onset}$	$V_{R^{CF}}_{onset}$
0.738	1.217	1.821	1.000	1.000	2.500
0.771	1.246	0.546	0.937	1.000	2.341
0.813	1.284	0.364	0.891	1.000	2.228
0.738	1.217	5.462	1.000	1.000	2.500
0.738	1.217	3.642	1.000	1.000	2.500
0.738	1.217	1.821	1.000	1.000	2.500
0.738	1.217	0.910	1.000	1.000	2.500
0.813	1.284	0.364	0.891	1.000	2.228
0.738	1.217	1.821	1.000	1.000	2.500
0.813	1.284	0.364	0.891	1.000	2.228
0.793	1.267	0.437	0.909	1.000	2.273
0.789	1.263	0.455	0.914	1.000	2.285
0.771	1.246	0.546	0.937	1.000	2.341
0.894	1.358	0.182	0.846	1.000	2.114
0.813	1.284	0.364	0.891	1.000	2.228

4.5 Analisis Gaya Hidrodinamis

Perhitungan gaya hidrodinamis ini dilakukan untuk mengetahui besar gaya yang diakibatkan oleh arus dan gelombang laut terhadap pipa. Gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa adalah gaya *drag* dan gaya angkat (*lift*).

4.5.1 Perhitungan Gaya *Drag*

Gaya *drag* pada analisis bentangan bebas mempengaruhi besar defleksi yang terjadi pada pipa. Sebelum gaya *drag* dihitung, koefisien drag harus diperoleh terlebih dahulu. Dalam persamaan ada beberapa parameter yang mempengaruhi gaya drag yang dijelaskan pada persamaan. Beberapa parameter awal yang digunakan untuk perhitungan koefisien *drag* ditampilkan pada Tabel 4.20 berikut :

Tabel 4. 20 Parameter Awal Perhitungan Koefisien *Drag*

PARAMETER KOEFISIEN DRAG				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D_t	0.549		m
Rasio k/ D_t	k/D_t	0.006		-
Frekuensi gelombang signifikan	ω_s	5.00	9.20	rad/s

Hasil parameter – parameter yang mempengaruhi koefisien *drag* dan besar koefisien *drag* ditampilkan pada Tabel 4.21 berikut :

Tabel 4. 21 Hasil Koefisien *Drag*

Koefisien <i>Drag</i>							
Length	Gap	C_D^0	$\Psi^{CD}_{KC,\alpha}$	Ψ^{CD}_{proxi}	Ψ^{CD}_{trench}	Ψ^{CD}_{VIV}	C_D
7	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
11	0.3	1.007	1	1.034	1	1.225	1.275
12	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
14	3	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
15	2	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
17	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243

Tabel 4. 21 Hasil Koefisien *Drag* (Lanjutan)

Koefisien <i>Drag</i>							
Length	Gap	C_D^0	$\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$	Ψ_{proxi}^{CD}	Ψ_{trench}^{CD}	Ψ_{VIV}^{CD}	C_D
20	0.5	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
21	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
22	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
24	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
24	0.24	1.007	1	1.057	1	1.221	1.299
24	0.25	1.007	1	1.053	1	1.222	1.294
34	0.3	1.007	1	1.034	1	1.225	1.275
36	0.1	1.007	1	1.162	1	1.211	1.416
36	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321

Setelah koefisien *drag* diperoleh, gaya *drag* dapat dihitung. Beberapa parameter lain yang digunakan dalam perhitungan gaya *drag* dan hasil perhitungan gaya *drag* ditampilkan pada Tabel 4.22 berikut :

Tabel 4. 22 Hasil Gaya *Drag*

GAYA DRAG			
Panjang Span Aktual (m)	Kecepatan Partikel Air (m/s)	Koefisien Gaya Drag	Gaya Drag (N)
7	1.102	1.243	424.798
11	1.030	1.275	371.353
12	1.013	1.321	359.097
14	1.171	1.243	479.648
15	1.144	1.243	457.960
17	1.102	1.243	424.798

Tabel 4. 22 Hasil Gaya *Drag* (Lanjutan)

GAYA DRAG			
Panjang Span Aktual (m)	Kecepatan Partikel Air (m/s)	Koefisien Gaya Drag	Gaya Drag (N)
20	1.102	1.243	424.711
21	1.030	1.321	371.346
22	1.038	1.243	376.678
24	1.036	1.321	375.582
24	1.030	1.299	371.349
24	1.066	1.294	397.362
34	1.044	1.275	381.402
36	1.044	1.416	381.388
36	1.030	1.321	371.346

4.5.2 Perhitungan Gaya *Lift*

Gaya *lift* atau angkat pada pipa muncul karena adanya aliran yang bekerja pada pipa. Beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan Gaya *Lift* ditampilkan pada Tabel 4.23 berikut :

Tabel 4. 23 Parameter Perhitungan Gaya *Lift*

Perhitungan Gaya <i>Lift</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_t	0.5492	m
Koefisien Lift	C_L	0.70	-

Beberapa parameter tambahan dan perhitungan Gaya Lift ditampilkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Perhitungan Gaya Lift

GAYA LIFT							
Panjang Span aktual (m)	Gap (m)	Kecepatan Partikel Total U_{tot} (m/s)		Koefisien gaya Lift		Gaya Lift (N)	
		1 Tahun	100 Tahun	1 Tahun	100 Tahun	1 Tahun	100 Tahun
7.00	1.00	0.718	1.102	0.700	0.700	101.536	239.204
11.00	0.30	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.109
12.00	0.20	0.649	1.013	0.700	0.700	82.961	202.207
14.00	3.00	0.771	1.171	0.700	0.700	117.150	270.089
15.00	2.00	0.751	1.144	0.700	0.700	110.983	257.877
17.00	1.00	0.718	1.102	0.700	0.700	101.536	239.204
20.00	0.50	0.718	1.102	0.700	0.700	101.534	239.155
21.00	0.20	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.105
22.00	1.00	0.668	1.038	0.700	0.700	87.886	212.107
24.00	0.20	0.667	1.036	0.700	0.700	87.597	211.490
24.00	0.24	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.106
24.00	0.25	0.691	1.066	0.700	0.700	94.016	223.754
34.00	0.30	0.673	1.044	0.700	0.700	89.237	214.767
36.00	0.10	0.673	1.044	0.700	0.700	89.236	214.759
36.00	0.20	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.105

4.5.3 Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total

Gaya Hidrodinamis Total yang digunakan merupakan hasil penjumlahan dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift*. Nilai Gaya hidrodinamis total ditampilkan pada Tabel 4.25

Tabel 4. 25 Perhitungan Gaya Hidrodinamis

GAYA HIDRODINAMIS TOTAL				
Panjang Span Aktual (m)	Gap (m)	Gaya Drag (N)	Gaya Lift (N)	Gaya Hidrodinamis Total (N)
7	1.00	424.798	239.204	664.002
11	0.30	371.353	209.109	580.462
12	0.20	359.097	202.207	561.304
14	3.00	479.648	270.089	749.737
15	2.00	457.960	257.877	715.837
17	1.00	424.798	239.204	664.002
20	0.50	424.711	239.155	663.866
21	0.20	371.346	209.105	580.451
22	1.00	376.678	212.107	588.786
24	0.20	375.582	211.490	587.072
24	0.24	371.349	209.106	580.455
24	0.25	397.362	223.754	621.117
34	0.30	381.402	214.767	596.169
36	0.10	381.388	214.759	596.147
36	0.20	371.346	209.105	580.451

4.6 Analisis Freespan

Analisis panjang *span* menggunakan *code* DNV RP F-105 merupakan analisis *span* pada pipa bawah laut yang menggunakan beberapa parameter yang lebih kompleks.

4.6.1 Penentuan *Boundary Condition*

Sebelum Panjang Span Efektif, *Effective Axial Force*, *Critical Buckling Load* dan *Static Deflection* dihitung asumsi tumpuan bentangan bebas perlu ditentukan terlebih dahulu. Asumsi tumpuan yang efektif digunakan untuk kasus bentangan bebas ini adalah *fixed-fixed*. Nilai koefisien *boundary condition* dari *fixed-fixed span* menurut DNV RP F-105 yang dijelaskan kembali dalam Tabel 4.26.

Tabel 4. 26 Koefisien *Boundary Condition*

	Pinned - Pinned ²⁾	Fixed - Fixed ³⁾	Single span on seabed
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C ₄	4.93	14.1	Shoulder $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span : 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384

5) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for.

6) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} .

7) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition.

8) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

4.6.2 Analisis Panjang Span Efektif

Panjang efektif bentangan bebas pipa dapat mempengaruhi frekuensi natural pipa terutama bentangan bebas pipa yang diasumsikan dengan tumpuan *span on seabed* dan *fixed-fixed*. Nilai panjang *free span* efektif juga bergantung pada nilai *Relative Soil Stiffness Number*. Studi kasus yang digunakan pada tugas akhir ini adalah pipa yang telah dilakukan survei *freespan* sebelumnya, sehingga panjang span yang digunakan merupakan panjang span aktual.

Oleh karena hal ini, panjang efektif bentangan bebas yang dihitung berdasarkan panjang tiap – tiap span aktualnya. Berikut adalah parameter yang digunakan untuk melakukan perhitungan panjang efektif ditampilkan pada Tabel 4.27.

Tabel 4. 27 Parameter perhitungan Panjang Span Efektif

Parameter Perhitungan Panjang Span Efektif			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	1.56E+07	N/m ²
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	1.18E+07	N/m ²
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.258	-
momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

Sehingga dihasilkan nilai panjang *free span* efektif untuk tiap bagian pipa yang terdapat *free span* untuk 2 kondisi, yaitu kondisi *in-line* dan kondisi *cross-flow*. Nilai panjang *free span* efektif untuk 2 kondisi ditampilkan pada Tabel 4.28 berikut.

Tabel 4. 28 Panjang *Span* Efektif untuk Arah *In-Line* & *Cross-Flow*

Cross-Flow				In-Line			
L m	β	L_{eff}/L	L_{eff} m	L m	β	L_{eff}/L	L_{eff} m
7.00	2.517	1.712	11.982	7.00	2.39	1.77	12.42
11.00	3.302	1.443	15.870	11.00	3.18	1.48	16.23
12.00	3.453	1.406	16.867	12.00	3.33	1.44	17.23
14.00	3.721	1.347	18.858	14.00	3.60	1.37	19.22
15.00	3.841	1.323	19.852	15.00	3.72	1.35	20.22
17.00	4.058	1.284	21.836	17.00	3.93	1.31	22.20
20.00	4.341	1.240	24.804	20.00	4.22	1.26	25.18
21.00	4.425	1.228	25.791	21.00	4.30	1.25	26.16
22.00	4.506	1.217	26.778	22.00	4.38	1.23	27.15
24.00	4.657	1.198	28.748	24.00	4.53	1.21	29.12
24.00	4.657	1.198	28.748	24.00	4.53	1.21	29.12
24.00	4.657	1.198	28.748	24.00	4.53	1.21	29.12
34.00	5.262	1.134	38.567	34.00	5.14	1.15	38.95
36.00	5.362	1.126	40.528	36.00	5.24	1.14	40.91
36.00	5.362	1.126	40.528	36.00	5.24	1.14	40.91

4.6.3 Effective Axial Force

Effective axial force dapat mempengaruhi besar frekuensi pipa bawah laut. Parameter yang digunakan untuk perhitungan ini dijelaskan pada Tabel 4.29 dan Tabel 4.30.

Tabel 4. 29 Perhitungan Nilai Perbedaan Tekanan

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas air laut	ρ_w	1025.00	kg/m ³
Kedalaman laut	h	90.00	m
Percepatan gravitasi	g	9.81	m/s ²
Tekanan Internal Desain	P_i	1.38E+07	Pa
Tekanan eksternal	P_e	9.05E+05	Pa
Perbedaan tekanan	ΔP	1.29E+07	Pa

Tabel 4. 30 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan tekanan	ΔP	1.29E+07	Pa
<i>Poisson's ratio</i> baja	ν_{st}	0.30	-
diameter dalam pipa	D_i	0.43	m
luas penampang internal pipa baja	A_i	0.15	m ²
luas penampang pipa baja	A_{st}	0.02	m ²
Koefisien <i>thermal expansion</i>	α_e	0.00	/°C
Temperatur Operasi	T_1	48.90	°C
Temperatur air laut	T_0	25.00	°C
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

Perhitungan *effective axial force* juga menambahkan parameter perbedaan tekanan (P) yang merupakan pengurangan antara tekanan internal pipa dan tekanan di luar pipa yang berupa tekanan hidrostatik. Perbedaan tekanan dihitung sehingga menghasilkan nilai P sesuai dengan tabel 4.33. Dari Parameter yang telah ditentukan di atas diperoleh hasil *effective axial force* sebesar -1.78×10^6 N

4.6.4 *Critical Buckling Load*

Critical Buckling Load merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural pipa bawah laut, Nilai parameter ini dipengaruhi oleh panjang bentangan bebas pipa. Selain panjang bentangan, beberapa parameter yang digunakan untuk perhitungan *critical buckling load* ditampilkan dalam Tabel 4.31

Tabel 4. 31 Parameter Perhitungan *Critical Buckling Load*

Parameter Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.258	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
Boundary condition	C_2	4.00	-

Nilai *Critical Buckling Load* untuk arah *in-line* dan *cross-flow* ditampilkan pada Tabel 4.32.

Tabel 4. 32 Nilai *Critical Buckling Load* Untuk Arah *In-line* dan *Cross-flow*

In-Line			Cross-Flow		
L	L_{eff}	P_{cr}	L	L_{eff}	L
m	m	N	m	m	m
7.00	12.42	3.14E+07	7.00	12.42	2.92E+07
11.00	16.23	1.79E+07	11.00	16.23	1.71E+07
12.00	17.23	1.58E+07	12.00	17.23	1.52E+07
14.00	19.22	1.27E+07	14.00	19.22	1.22E+07
15.00	20.22	1.14E+07	15.00	20.22	1.10E+07
17.00	22.20	9.45E+06	17.00	22.20	9.14E+06
20.00	25.18	7.33E+06	20.00	25.18	7.11E+06
21.00	26.16	6.78E+06	21.00	26.16	6.58E+06
22.00	27.15	6.29E+06	22.00	27.15	6.11E+06
24.00	29.12	5.45E+06	24.00	29.12	5.31E+06
24.00	29.12	5.45E+06	24.00	29.12	5.31E+06
24.00	29.12	5.45E+06	24.00	29.12	5.31E+06
34.00	38.95	3.03E+06	34.00	38.95	2.97E+06
36.00	40.91	2.74E+06	36.00	40.91	2.69E+06
36.00	40.91	2.74E+06	36.00	40.91	2.69E+06

4.6.5 Static Deflection

Static Deflection juga merupakan salah satu parameter yang menentukan besar frekuensi natural pipa. Parameter ini juga dipengaruhi oleh panjang efektif bentangan bebas pipa dan beban defleksi. Beban defleksi untuk arah *in-line* adalah total gaya hidrodinamis, sedangkan untuk arah *cross-flow* adalah berat terendam pipa. Selain itu, beberapa parameter lain yang digunakan untuk memperoleh *static deflection* ditampilkan dalam Tabel 4.33.

Tabel 4. 33 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.258	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
Boundary condition	C_6	0.0026	-
Effective Axial Force	S_{eff}	-1.78E+06	N
Berat terendam pipa (<i>q cross-flow</i>)	W_{sub}	1091.42	N/m

Sehingga *static deflection* dapat ditentukan, dan hasilnya dijelaskan dalam Tabel 4.34 dan Tabel 4.35

Tabel 4. 34 *Static Deflection* Arah *In-Line*

In-Line				
L	L_{eff}	P_{cr}	Gaya Hidrodinamis Total	δ
m	m	N	N/m	m
7.00	12.42	2.92E+07	424.798	2.46E-04

Tabel 4. 34 *Static Deflection Arah In-Line* (Lanjutan)

In-Line				
L	L _{eff}	P _{cr}	Gaya Hidrodinamis Total	δ
m	m	N	N/m	m
11.00	16.23	1.71E+07	371.353	6.57E-04
12.00	17.23	1.52E+07	359.097	8.18E-04
14.00	19.22	1.22E+07	479.648	1.75E-03
15.00	20.22	1.10E+07	457.960	2.08E-03
17.00	22.20	9.14E+06	424.798	2.93E-03
20.00	25.18	7.11E+06	424.711	5.19E-03
21.00	26.16	6.58E+06	371.346	5.44E-03
22.00	27.15	6.11E+06	376.678	6.59E-03
24.00	29.12	5.31E+06	375.582	9.27E-03
24.00	29.12	5.31E+06	371.349	9.17E-03
24.00	29.12	5.31E+06	397.362	9.81E-03
34.00	38.95	2.97E+06	381.402	5.00E-02
36.00	40.91	2.69E+06	381.388	7.20E-02
36.00	40.91	2.69E+06	371.346	7.01E-02

Tabel 4. 35 *Static Deflection Arah Cross-Flow*

Cross-Flow			
L	L _{eff}	P _{cr}	δ
m	m	N	m
7.00	11.98	3.14E+07	5.44E-04
11.00	15.87	1.79E+07	1.75E-03
12.00	16.87	1.58E+07	2.27E-03
14.00	18.86	1.27E+07	3.66E-03
15.00	19.85	1.14E+07	4.58E-03
17.00	21.84	9.45E+06	6.98E-03
20.00	24.80	7.33E+06	1.25E-02
21.00	25.79	6.78E+06	1.49E-02
22.00	26.78	6.29E+06	1.79E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
34.00	38.57	3.03E+06	1.34E-01
36.00	40.53	2.74E+06	1.91E-01
36.00	40.53	2.74E+06	1.91E-01

4.6.6 Frekuensi Natural Pipa

Frekuensi natural pipa merupakan parameter penting yang harus ditentukan karena parameter ini digunakan sebagai tolak ukur penentuan panjang maksimum bentangan bebas pipa bawah laut yang boleh terjadi. Jika frekuensi natural pipa bawah laut mendekati frekuensi *vortex*

shedding yang terjadi di daerah pipa, maka pipa akan mengalami getaran yang dapat mengakibatkan kegagalan kelelahan pada pipa.

Frekuensi natural pipa dihitung menggunakan persamaan yang membutuhkan beberapa parameter yang telah ditentukan dan dihitung sebelumnya. Parameter ditampilkan dalam Tabel 4.36

Tabel 4. 36 Parameter Perhitungan *Fundamental Natural Frequency*

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.26	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
Boundary condition	C_1	3.56	-
	C_3	0.20	-
Effective Axial Force	S_{eff}	- 1.78E+06	N
Diameter total pipa	D_t	0.55	m

Frekuensi natural pipa kemudian dihitung dari setiap bentangan bebas aktual yang ada untuk kondisi *in-line* dan *cross-flow* yang hasilnya dijelaskan pada Tabel 4.37 dan Tabel 4.38.

Tabel 4. 37 Nilai Frekuensi Natural Arah *In-Line*

In-Line					
L	L_{eff}	P_{cr}	δ	me	f_1
m	m	N	m	Kg/m	Hz
7	12.420	2.92E+07	2.46E-04	596.885	9.781
11	16.233	1.71E+07	6.57E-04	623.306	5.472
12	17.229	1.52E+07	8.18E-04	656.911	4.697

Tabel 4. 37 Nilai Frekuensi Natural Arah *In-Line* (Lanjutan)

In-Line					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f _l
m	m	N	m	Kg/m	Hz
14	19.221	1.22E+07	1.75E-03	596.885	3.894
15	20.216	1.10E+07	2.08E-03	596.885	3.488
17	22.204	9.14E+06	2.93E-03	596.885	2.834
20	25.176	7.11E+06	5.19E-03	596.885	2.127
21	26.164	6.58E+06	5.44E-03	656.911	1.851
22	27.152	6.11E+06	6.59E-03	596.885	1.778
24	29.125	5.31E+06	9.27E-03	656.911	1.426
24	29.125	5.31E+06	9.17E-03	641.163	1.444
24	29.125	5.31E+06	9.81E-03	637.773	1.448
34	38.952	2.97E+06	5.00E-02	623.306	0.637
36	40.914	2.69E+06	7.20E-02	722.545	0.494
36	40.914	2.69E+06	7.01E-02	656.911	0.518

Tabel 4. 38 Nilai Frekuensi Natural Arah *Cross-Flow*

Cross-Flow					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f _l
m	m	N	m	kg/m	Hz
7	11.982	3.14E+07	5.44E-04	596.885	10.532
11	15.870	1.79E+07	1.75E-03	623.306	5.740

Tabel 4. 38 Nilai Frekuensi Natural Arah *Cross-Flow* (Lanjutan)

Cross-Flow					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	m _e	f ₁
m	m	N	m	kg/m	Hz
12	16.867	1.58E+07	2.27E-03	656.911	4.915
14	18.858	1.27E+07	3.66E-03	596.885	4.059
15	19.852	1.14E+07	4.58E-03	596.885	3.630
17	21.836	9.45E+06	6.98E-03	596.885	2.941
20	24.804	7.33E+06	1.25E-02	596.885	2.202
21	25.791	6.78E+06	1.49E-02	656.911	1.916
22	26.778	6.29E+06	1.79E-02	596.885	1.838
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	656.911	1.474
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	641.163	1.492
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	637.773	1.496
34	38.567	3.03E+06	1.34E-01	623.306	0.667
36	40.528	2.74E+06	1.91E-01	722.545	0.528
36	40.528	2.74E+06	1.91E-01	656.911	0.553

4.7 Screening Kriteria Fatigue

Screening kriteria *fatigue* pipa dilakukan berdasarkan DNV-RP-F-105 (2006) untuk arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada Tabel 4.39 dan Tabel 4.40 masing - masing merupakan parameter yang digunakan untuk *screening* arah *in-line* dan *cross-flow*.

Tabel 4. 39 Parameter *Screening* Arah *In-Line*

Parameter <i>Screening</i> Arah <i>In-Line</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa	D_t	0.549	m
<i>Safety factor in-line</i>	γ_{IL}	1.4	-

Tabel 4. 40 Parameter *Screening* Arah *Cross-Flow*

Parameter <i>Screening</i> Arah <i>Cross-Flow</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa	D_t	0.549	m
<i>Safety factor in-line</i>	γ_{CF}	1.4	-

Setelah mengetahui parameter yang diperlukan untuk melakukan *screening*, langkah berikutnya adalah melakukan *screening* dengan mengelompokkan ruas kanan dan kiri yang akan dibandingkan untuk arah *in-line* dan untuk arah *cross-flow*. Tabel 4.41 dan Tabel 4.42 merupakan hasil *screening* untuk masing – masing arah *in-line* dan *cross-flow*. Pada kedua tabel tersebut terdapat keterangan “LOLOS” yang berarti panjang *freespan* tersebut lolos *screening* dan “TIDAK LOLOS” yang berarti sebaliknya.

Tabel 4. 41 Hasil *Screening* arah *In-Lin*

In-Line							
L	$f_{n, IL}$	$f_{n, IL} /$ γ_{IL}	$V_{R^{IL}}^{\text{onset}}$	Uc 100 year	α	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s			
7	9.781	6.986	1.217	0.918	0.995	1.309	LOLOS
11	5.472	3.909	1.246	0.846	0.995	1.143	LOLOS
12	4.697	3.355	1.284	0.829	0.995	1.078	LOLOS
14	3.894	2.782	1.217	0.986	0.996	1.331	LOLOS
15	3.488	2.492	1.217	0.960	0.996	1.285	LOLOS

Tabel 4. 41 Hasil *Screening* arah *In-Line* (Lanjutan)

In-Line							
L	$f_{n, IL}$	$f_{n, IL} / \gamma_{IL}$	$V_{R_{onset}}^{IL}$	Uc 100 year	α	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s			
17	2.834	2.024	1.217	0.918	0.995	1.209	LOLOS
20	2.127	1.519	1.217	0.918	0.995	1.179	LOLOS
21	1.851	1.322	1.284	0.846	0.995	1.021	LOLOS
22	1.778	1.270	1.217	0.853	0.995	1.078	LOLOS
24	1.426	1.019	1.284	0.852	0.995	1.002	LOLOS
24	1.444	1.031	1.267	0.846	0.995	1.009	LOLOS
24	1.448	1.034	1.263	0.882	0.994	1.055	TIDAK LOLOS
34	0.637	0.455	1.246	0.860	0.995	0.950	TIDAK LOLOS
36	0.494	0.353	1.358	0.860	0.995	0.855	TIDAK LOLOS
36	0.518	0.370	1.284	0.846	0.995	0.889	TIDAK LOLOS

Tabel 4. 42 Hasil *Screening* arah *Cross-Flow*

Cross-Flow							
L	$f_{n, CF}$	$f_{n, CF} / \gamma_{CF}$	$V_{R_{onset}}$	Uc 100 year	Uw 1 year	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz			m/s	m/s		
7	10.532	7.523	2.500	0.918	4.21E-03	0.671	LOLOS
11	5.740	4.100	2.341	0.846	4.20E-03	0.661	LOLOS
12	4.915	3.510	2.228	0.829	4.20E-03	0.681	LOLOS
14	4.059	2.899	2.500	0.986	4.29E-03	0.721	LOLOS
15	3.630	2.593	2.500	0.960	4.24E-03	0.702	LOLOS

Tabel 4. 42 Hasil *Screening* arah *Cross-Flow* (Lanjutan)

Cross-Flow							
L	$f_{n, CF}$	$f_{n, CF}$	$V_{Rcfonset}$	Uc 100 year	Uw 1 year	Ruas Kanan	Kriteria
m	Hz	$/ \gamma_{CF}$		m/s	m/s		
17	2.941	2.101	2.500	0.918	4.21E-03	0.671	LOLOS
20	2.202	1.573	2.500	0.918	4.20E-03	0.671	LOLOS
21	1.916	1.368	2.228	0.846	4.20E-03	0.695	LOLOS
22	1.838	1.313	2.500	0.853	4.21E-03	0.625	LOLOS
24	1.474	1.053	2.228	0.852	4.20E-03	0.700	LOLOS
24	1.492	1.066	2.273	0.846	4.20E-03	0.681	LOLOS
24	1.496	1.069	2.285	0.882	5.17E-03	0.707	LOLOS
34	0.667	0.476	2.341	0.860	4.20E-03	0.672	TIDAK LOLOS
36	0.528	0.377	2.114	0.860	4.20E-03	0.744	TIDAK LOLOS
36	0.553	0.395	2.228	0.846	4.20E-03	0.695	TIDAK LOLOS

4.8 Analisis Tegangan Pada Bentangan Bebas Hasil *Screening*

a. *Hoop Stress*

Hasil perolehan perhitungan manual nilai *Hoop Stress* dicek dengan *Allowable Stress* yang ada pada ASME B31.8. Hasil tersebut ditampilkan pada Tabel 4.43

Tabel 4. 43 Cek Hasil *Hoop Stress* dengan ASME B31.8

σ_h	0.72 SMYS	Rasio
231.92 MPa	322.56 MPa	0.72
ok		

Hasil dari analisis, tegangan *hoop stress* pada pipa masih memenuhi batas yang ditentukan oleh ASME B31.8.

b. Longitudinal Stress

Tegangan *Longitudinal* sesuai yang sudah dijelaskan merupakan kombinasi dari tegangan aksial, tegangan *poisson*, tegangan *thermal* dan tegangan *bending*. Hasil penjumlahan dari tegangan aksial, tegangan *poisson* dan tegangan *thermal* menghasilkan tegangan aksial kombinasi.

Tegangan longitudinal kemudian dapat dihitung dengan menjumlahkan tegangan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Hasil tegangan longitudinal yang digunakan adalah nilai terbesar dari penjumlahan aksial kombinasi dan tegangan *bending*. Setelah diperoleh, kembali dilakukan pengecekan hasil dengan *Allowable Stress* yang ada pada ASME B31.8. Semua hasil perhitungan untuk Tegangan longitudinal ditampilkan pada Tabel 4.44 berikut.

Tabel 4. 44 Validasi *Longitudinal Stress* dengan ASME B31.8

TEGANGAN LONGITUDINAL							Cek ASME B31.8	RASIO
Panjang Bentangan Bebas Aktual	TEGANGAN				Longitudinal maksimum	0.8 SMYS		
	Aksial Kombinasi	Bending	Longitudinal					
m	MPa	MPa	MPa	MPa	Mpa	MPa		MPa
7	25.48	3.68	29.16	21.80	29.16	358.40	ok	0.08
11	25.48	8.95	34.43	16.54	34.43	358.40	ok	0.10
12	25.48	10.61	36.09	14.87	36.09	358.40	ok	0.10
14	25.48	14.99	40.47	10.50	40.47	358.40	ok	0.11
15	25.48	17.08	42.56	8.40	42.56	358.40	ok	0.12
17	25.48	21.71	47.19	3.78	47.19	358.40	ok	0.13
20	25.48	30.04	55.53	-4.56	55.53	358.40	ok	0.15
21	25.48	32.61	58.09	-7.12	58.09	358.40	ok	0.16
22	25.48	35.84	61.32	-10.36	61.32	358.40	ok	0.17
24	25.48	42.64	68.12	-17.15	68.12	358.40	ok	0.19
24	25.48	42.59	68.07	-17.10	68.07	358.40	ok	0.19

Dapat dilihat dari hasil analisis, nilai tegangan *longitudinal* pada masing masing panjang *span* aktual yang ada masih memenuhi batas kriteria yang ditentukan oleh ASME B31.8

c. Tegangan *Von Mises*

Setelah nilai tegangan *Hoop Stress* dan Tegangan *Longitudinal* didapat, tegangan *von mises* dapat ditentukan. Nilai hasil perhitungan *Von Mises Stress* dan pengecekan hasil nya terhadap ASME B31.8 ditampilkan pada Tabel 4.45 berikut.

Tabel 4. 45 Validasi *Von Mises Stress* dengan ASME B31.8

TEGANGAN VON MISES						
Panjang Bentangan Bebas	TEGANGAN			0.9 SMYS	Cek ASME B31.8	RASIO
	<i>Hoop</i>	Longitudinal	<i>Von Mises</i>			
m	MPa	Mpa	MPa			MPa
7	231.92	29.16	218.80	403.20	ok	0.54
11	231.92	34.43	216.77	403.20	ok	0.54
12	231.92	36.09	216.15	403.20	ok	0.54
14	231.92	40.47	214.57	403.20	ok	0.53
15	231.92	42.56	213.84	403.20	ok	0.53
17	231.92	47.19	212.30	403.20	ok	0.53
20	231.92	55.53	209.75	403.20	ok	0.52
21	231.92	58.09	209.02	403.20	ok	0.52
22	231.92	61.32	208.15	403.20	ok	0.52
24	231.92	68.12	206.47	403.20	ok	0.51
24	231.92	68.07	206.48	403.20	ok	0.51

Dapat dilihat, nilai tegangan *von mises* pada setiap panjang bentangan bebas yang ada masih memenuhi *Allowable Stress* yang ditetapkan oleh ASME B31.8.

4.9 Analisis Sisa Umur Kelelahan Bentangan Bebas Pipa

Langkah dan analisis perhitungan mengacu pada DNV RP F105 dan DNV RP C203. Kemudian besar *fatigue damage* dapat dihitung

dengan metode Palmgreen-Miner. Panjang *span* yang dianalisis hanya *span* yang memenuhi *screening criteria fatigue* yang telah dilakukan sebelumnya untuk dapat memperkirakan umur sisa dari bagian *free span* pada pipa. Untuk yang tidak memenuhi direkomendasikan untuk dihitung lebih lanjut atau diretifikasi oleh perusahaan.

4.9.1 Unit Stress Amplitude

Nilai *Unit Stress Amplitude* berhubungan erat dengan nilai *stress range* untuk tiap arah (*arah in-line* atau *cross-flow*). Berikut parameter yang digunakan untuk perhitungan nilai *Unit Stress Amplitude* ditampilkan pada Tabel 4.46

Tabel 4. 46 Perhitungan *Unit Stress Amplitude*

Perhitungan Unit Stress Amplitude		
Parameter	Notasi	Nilai
C4	C4	14.1
Diameter total	Dt	0.5492
Diameter pipa	OD	0.4572
modulus young baja	E	2.07E+11
wall thickness	t	0.0127
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.258
<i>Safety Factor for Fatigue</i>	γ	1.3

Hasil perhitungan *Unit Stress Amplitude* untuk arah *In-Line* dan *Cross-Flow* ditampilkan pada Tabel 4.47.

Tabel 4. 47 Nilai *Unit Stress Amplitude In-Line & Cross-Flow*

<i>In-Line</i>			<i>Cros-Flow</i>		
L aktual	L effektif	<i>Stress Amplitude In-Line</i>	L aktual	L effektif	<i>Stress Amplitude Cross-Flow</i>
7	12.420	5.81E+09	7	11.982	6.24E+09
11	16.233	3.40E+09	11	15.870	3.56E+09
12	17.229	3.02E+09	12	16.867	3.15E+09

Tabel 4. 47 Nilai *Unit Stress Amplitude In-Line & Cross-Flow* (Lanjutan)

<i>In-Line</i>			<i>Cross-Flow</i>		
L aktual	L efektif	<i>Stress Amplitude In-Line</i>	L aktual	L efektif	<i>Stress Amplitude Cross-Flow</i>
14	19.221	2.43E+09	14	18.858	2.52E+09
15	20.216	2.19E+09	15	19.852	2.27E+09
17	22.204	1.82E+09	17	21.836	1.88E+09
20	25.176	1.41E+09	20	24.804	1.46E+09
21	26.164	1.31E+09	21	25.791	1.35E+09
22	27.152	1.22E+09	22	26.778	1.25E+09
24	29.125	1.06E+09	24	28.748	1.08E+09
24	29.125	1.06E+09	24	28.748	1.08E+09

4.9.2 *Stress Range*

Berikut parameter dan perhitungan *Stress Range* untuk arah *In-Line* dan arah *Cross-flow* ditampilkan pada Tabel 4.48 dan Tabel 4.49.

Tabel 4. 48 *Stress Range* untuk Arah *In-line*

<i>In-Line</i>							
Panjang span aktual (m)	Panjang span efektif (m)	<i>Stress Amplitude In-Line</i>	Ay/D	α	Ψ	<i>Stress Range (Pa)</i>	<i>Stress Range (MPa)</i>
7	12.420	5.81E+09	0.01	1.00	1	1.51E+08	1.51E+02
11	16.233	3.40E+09	0.01	1.00	1	8.84E+07	8.84E+01
12	17.229	3.02E+09	0.01	0.99	1	7.85E+07	7.85E+01
14	19.221	2.43E+09	0.01	1.00	1	6.31E+07	6.31E+01
15	20.216	2.19E+09	0.01	1.00	1	5.70E+07	5.70E+01
17	22.204	1.82E+09	0.01	1.00	1	4.73E+07	4.73E+01
20	25.176	1.41E+09	0.01	1.00	1	3.68E+07	3.68E+01
21	26.164	1.31E+09	0.01	1.00	1	3.40E+07	3.40E+01

Tabel 4. 48 *Stress Range* untuk Arah *In-line* (Lanjutan)

<i>In-Line</i>							
Panjang span aktual (m)	Panjang span efektif (m)	<i>Stress Amplitude In-Line</i>	Ay/D	α	Ψ	<i>Stress Range</i> (Pa)	<i>Stress Range</i> (MPa)
22	27.152	1.22E+09	0.01	1.00	1	3.16E+07	3.16E+01
24	29.125	1.06E+09	0.01	1.00	1	2.75E+07	2.75E+01
24	29.125	1.06E+09	0.01	1.00	1	2.75E+07	2.75E+01

Tabel 4. 49 *Stress Range* untuk Arah *Cross Flow*

<i>Cross Flow</i>							
Panjang span aktual (m)	Panjang span efektif (m)	<i>Stress Amplitude Cross-Flow</i>	Az/D	Ksd	Rk	<i>Stress Range</i> (Pa)	<i>Stress Range</i> (MPa)
7	11.982	6.24E+09	0.071	0.738	0.889	1.03E+09	1.03E+03
11	15.870	3.56E+09	0.067	0.771	0.884	5.47E+08	5.47E+02
12	16.867	3.15E+09	0.064	0.813	0.878	4.58E+08	4.58E+02
14	18.858	2.52E+09	0.071	0.738	0.889	4.16E+08	4.16E+02
15	19.852	2.27E+09	0.071	0.738	0.889	3.75E+08	3.75E+02
17	21.836	1.88E+09	0.071	0.738	0.889	3.10E+08	3.10E+02
20	24.804	1.46E+09	0.071	0.738	0.889	2.40E+08	2.40E+02
21	25.791	1.35E+09	0.064	0.813	0.878	1.96E+08	1.96E+02
22	26.778	1.25E+09	0.071	0.738	0.889	2.06E+08	2.06E+02
24	28.748	1.08E+09	0.064	0.813	0.878	1.58E+08	1.58E+02
24	28.748	1.08E+09	0.065	0.793	0.881	1.61E+08	1.61E+02

4.9.3 Analisis Siklus *Stress* Pada Bentangan Bebas Pipa

Pendekatan perhitungan jumlah siklus tegangan sampai menjadi gagal (N) menggunakan *Palmgreen – Miner Rule*. Semua persamaan yang diterapkan dalam penentuan sisa umur kelalahan bentangan bebas pipa mengacu pada *code* DNV. Metode yang dilakukan untuk mencari nilai siklus tegangan pada struktur bentangan bebas pipa dengan kurva SN.

Langkah pertama adalah menentukan kategori kurva SN pada kode DNV RP – C 203 yang mendekati kriteria struktur. Penentuan kategori kurva SN struktur yang digunakan dalam analisa *fatigue* dan disesuaikan dalam Tabel A.9 kode DNV RP – C 203. Dalam tabel tersebut mengklasifikasikan detail struktur *tubular*, karena struktur pada Tugas Akhir ini adalah pipa. Kemudian diperoleh kategori yang mendekati kesesuaian dengan struktur pipa yaitu kategori D.

Langkah berikutnya yaitu menentukan jumlah nilai siklus tegangan struktur dan nilai siklus tegangan menuju kegagalan pada *stress range*. Perkiraan jumlah siklus tegangan menuju kegagalan atau (N) tiap segmen bentangan bebas pipa dapat ditentukan dengan Persamaan 2.61. Sedangkan perkiraan jumlah siklus tegangan dalam struktur pada *stress range* atau (n) tiap segmen bentangan bebas pipa, dapat ditentukan dengan *plotting* dalam Gambar 2.6. Pada perkiraan jumlah siklus tegangan pada struktur biasanya terjadi sekitar 2% - 10% dari nilai siklus terjadi. Pemilihan jenis kurva S-N sudah didapatkan pada paragraf sebelumnya yaitu kurva SN kategori D.

Penentuan siklus tegangan yang didahulukan terlebih dahulu yaitu jumlah nilai siklus tegangan menuju kegagalan. Setelah itu dilakukan penentuan jumlah nilai siklus tegangan yang pada struktur dengan persamaan. Untuk nilai $N \leq 106 \text{ cycles}$, maka $m = 3$ dan $\log a = 11.764$. Sedangkan nilai $N > 106 \text{ cycles}$, maka $m = 5$ dan $\log a = 15.606$.

4.9.4 Akumulasi *Fatigue Damage* dan *Fatigue Life*

Langkah terakhir yaitu prediksi sisa umur operasi pada tiap panjang bentangan bebas pipa yang terjadi di lapangan. Hasil perhitungan

akumulasi *fatigue damage* dan sisa umur operasi pada tiap bentangan bebas pipa ditampilkan pada Tabel 4.50 dan Tabel 4.51:

Tabel 4. 50 *Fatigue Life Arah In-line*

Keadaan <i>In-line</i>					
Panjang Span Aktual	N	n	Dfat OS F101	Dfat RP F105	fatigue life
m	cycles	cycles			years
7	1.68E+05	2.10E+05	6.24E-02	1.56E-01	44.9
11	8.40E+05	8.90E+05	5.30E-02	1.33E-01	52.8
12	1.35E+06	1.60E+06	5.91E-02	1.48E-01	47.4
14	4.04E+06	4.03E+06	4.99E-02	1.25E-01	56.2
15	6.69E+06	6.90E+06	5.15E-02	1.29E-01	54.3
17	1.71E+07	1.80E+07	5.26E-02	1.32E-01	53.2
20	6.00E+07	7.30E+07	6.08E-02	1.52E-01	46.1
21	8.83E+07	9.80E+07	5.55E-02	1.39E-01	50.4
22	1.28E+08	1.60E+08	6.26E-02	1.56E-01	44.7
24	2.58E+08	2.80E+08	5.43E-02	1.36E-01	51.6
24	2.58E+08	2.80E+08	5.43E-02	1.36E-01	51.6

Tabel 4. 51 *Fatigue Life Arah Cross-flow*

Keadaan <i>Cross flow</i>					
Panjang Span Aktual	N	n	Dfat	D fat rpf 105	fatigue life
m	cycle	cycle			years
7	5.31E+02	5.80E+02	5.46E-02	1.37E-01	51.3
11	3.55E+03	3.40E+03	4.79E-02	1.20E-01	58.3
12	6.06E+03	6.20E+03	5.11E-02	1.28E-01	54.8
14	8.07E+03	8.10E+03	5.02E-02	1.25E-01	55.8
15	1.10E+04	1.20E+04	5.46E-02	1.37E-01	51.2
17	1.94E+04	1.90E+04	4.88E-02	1.22E-01	57.3
20	4.18E+04	4.30E+04	5.15E-02	1.29E-01	54.4
21	7.75E+04	6.90E+04	4.45E-02	1.11E-01	62.9
22	6.61E+04	6.80E+04	5.14E-02	1.29E-01	54.5
24	1.49E+05	1.83E+05	6.16E-02	1.54E-01	45.5
24	1.39E+05	1.85E+05	6.68E-02	1.67E-01	41.9

Dari tabel di atas terlihat hasil perhitungan umur lelah pipa untuk 2 gerakan. Umur lelah gerakan *in-line* relative lebih kecil jika dibandingkan dengan umur lelah gerakan *cross-flow*. Semakin panjang aktual *span* nya, maka umur kelelahannya semakin pendek. Kecenderungan ini berlaku untuk umur kelelahan secara *in-line* dan *cross-flow*. Untuk umur lelah secara *in-line*, juga dipengaruhi nilai *reduction function*. Nilai ini sangat dipengaruhi oleh nilai perbandingan antara kecepatan arus dengan penjumlahan kecepatan arus dan gelombang. Sedangkan untuk nilai umur lelah secara *cross-flow* dipengaruhi oleh nilai

parameter kestabilan. Nilai Ksd ini digunakan untuk mencari nilai *Reduction Factor Damping* (Rk) yang juga mempengaruhi nilai dan umur lelah. Semakin besar nilai Ksd, maka nilai Rk semakin kecil dan umur kelelahannya juga semakin kecil.

4.10 Permodelan Menggunakan ANSYS CFX & *Static Structural*

Pemodelan ini dilakukan sebagai validasi perhitungan manual tegangan yang telah dibahas sebelumnya. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan ANSYS CFX (*Computational Fluid Dynamic*) dan ANSYS *Static Structural*. Pemodelan CFX dimaksudkan untuk mengetahui pola aliran fluida yang mengenai pipa bawah laut dan *pressure* yang diterima pipa. Sedangkan pemodelan *Static Structural* untuk mengetahui tegangan

yang terjadi pada struktur bentangan bebas. Langkah pengerjaan pemodelan dilakukan dengan memodelkan fluida dengan ANSYS CFX untuk mendapatkan *pressure* arus terhadap pipa, kemudian dimodelkan lagi ke ANSYS *Static Structural* untuk memperoleh nilai pendekatan tegangan maksimum *von mises*.

Dalam pembahasan Tugas Akhir ini hanya melakukan pemodelan ANSYS CFX pada bagian struktur pipa bawah laut yang mengalami bentangan bebas dengan kriteria sebagai berikut :

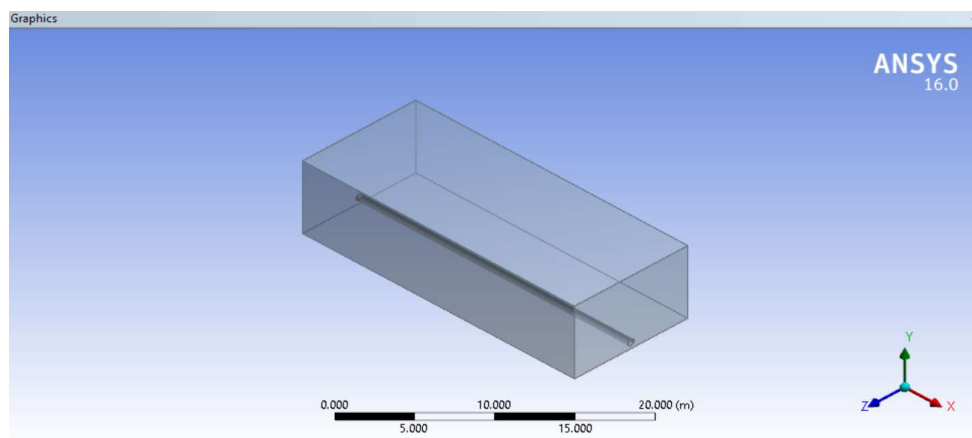
1. Bentangan bebas memenuhi kriteria *screening criteria fatigue* menurut DNV RP F105
2. Memiliki panjang bentang bebas pipa terpanjang setelah lolos dari kriteria sebelumnya.

Kriteria ini dimaksudkan untuk membatasi pemodelan jumlah bentangan bebas yang dibahas dalam subbab ini. Maka dari itu, bentangan bebas yang akan dimodelkan dalam ANSYS CFX yaitu bentangan bebas pipa dengan panjang *span* aktual 24 m dan *gap* sebesar 024 m. Masing-masing pemodelan dibahas dalam subbab berikutnya.

4.10.1 ANSYS CFX

4.10.2 Permodelan Model ANSYS CFX

1. Menggambarkan geometri permodelan *free span* yang ditinjau. Permodelan yang sebelumnya telah dilakukan di *software* SOLIDWORK di *convert* ke dalam CFX lalu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah diskritisasi dari elemen dan merupakan bagian terpenting dari ANSYS. Adapun variable geometri yang digunakan adalah diameter terluar *free span* dan panjang dari *free span*. Dalam tugas akhir ini, nilai panjang dari *free span* adalah 24 m dengan diameter 0,548 m dan gap sebesar 0,24 m. Gambar permodelan ditampilkan pada Gambar 4.3 berikut

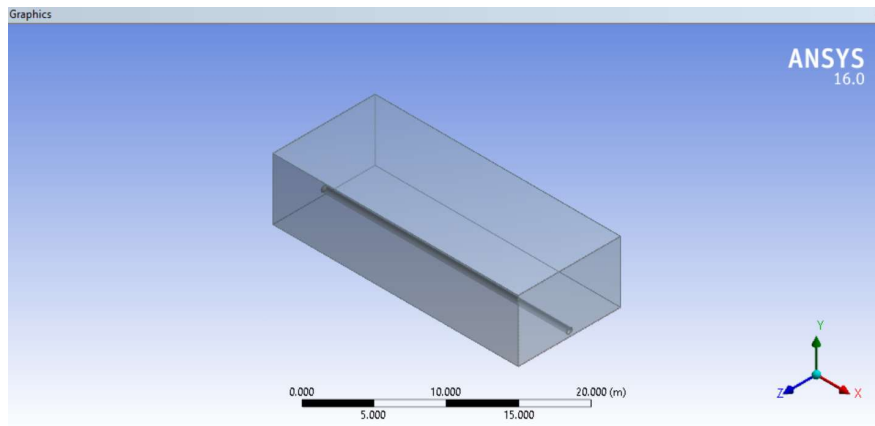


Gambar 4. 3 Permodelan Geometri dari *Free Span* yang Ditinjau

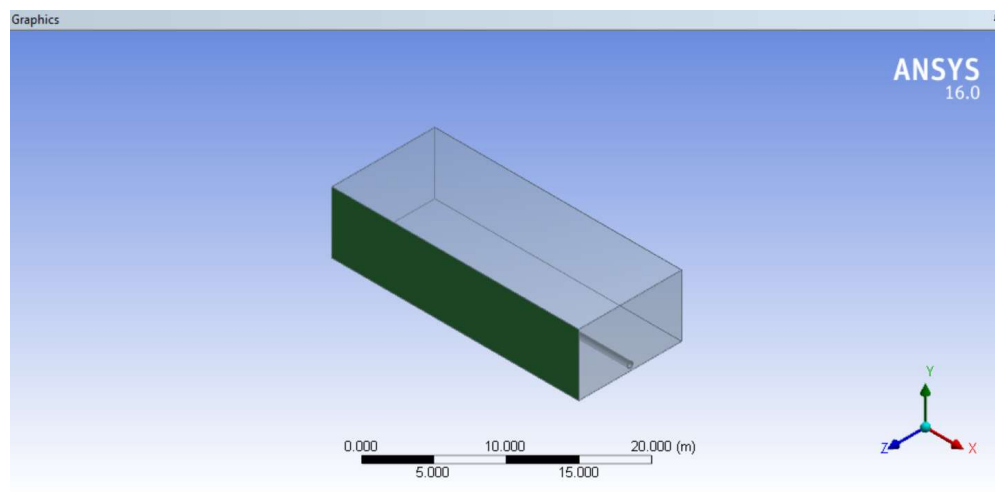
Permodelan di atas merupakan hasil dari SOLIDWORK yang di *convert* ke dalam ANSYS CFX. Untuk balok merupakan domain arus laut, dan model silinder merupakan model dari *free span* yang ditinjau.

2. Tahapan berikutnya adalah memberikan nama sisi *part* yang dimodelkan. Seperti sisi balok yang digunakan untuk arah awal arus mengalir diberi nama *inlet* dan akhir arus bergerak diberi nama *outlet*. Sisi balok yang lain diberi nama *wall*. Kemudian untuk struktur bentangan bebas diberi nama

pipa. Gambar permukaan model ditampilkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5

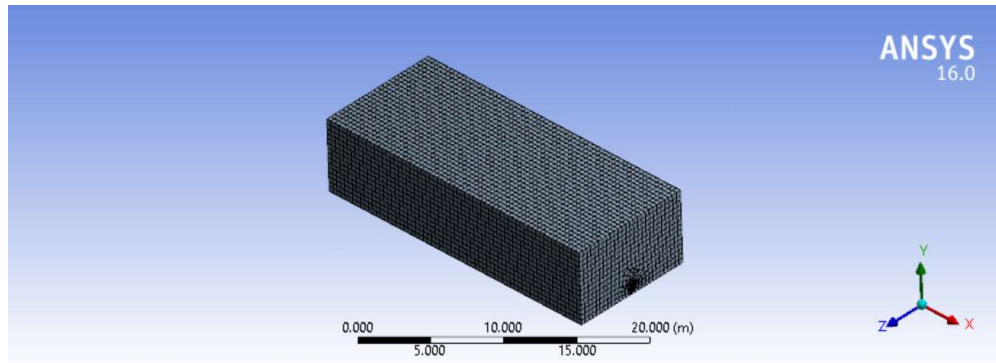


Gambar 4. 4 Aliran *Inlet* (sisi kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geometri



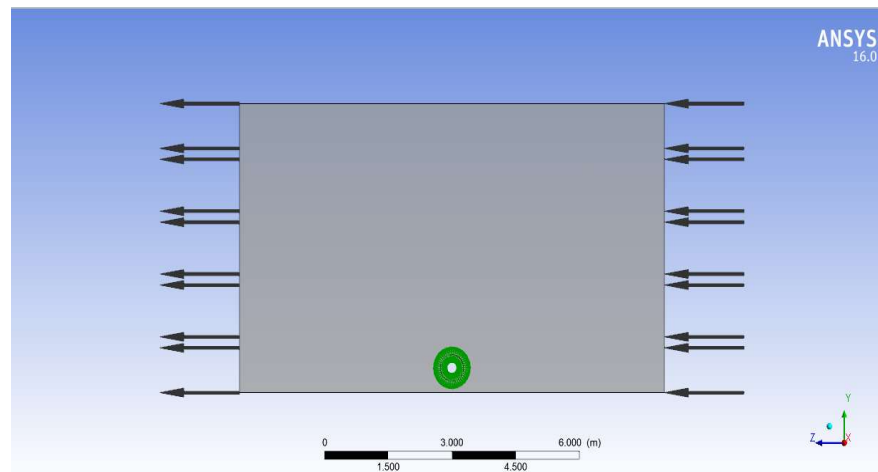
Gambar 4. 5 Aliran *Outlet* (Kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geometri

3. Tahapan selanjutnya adalah pemberian *meshing* pada model *free span*. Untuk melihat jumlah elemen (*meshing*) yang terbentuk yaitu dengan cara memasukkan nilai *Max Face Time* sehingga didapatkan jumlahnya. Model *meshing* yang dilakukan dibuat sekecil mungkin. Nilai *Max Face Time* yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *default* dari programnya yaitu 0,389540 m dengan jumlah elemen yang dihasilkan sebesar 36791 Elemen. Berikut visualisasi *meshing* pada model ditampilkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Visualisasi *Meshing* Geometri *Free Span* yang Ditinjau

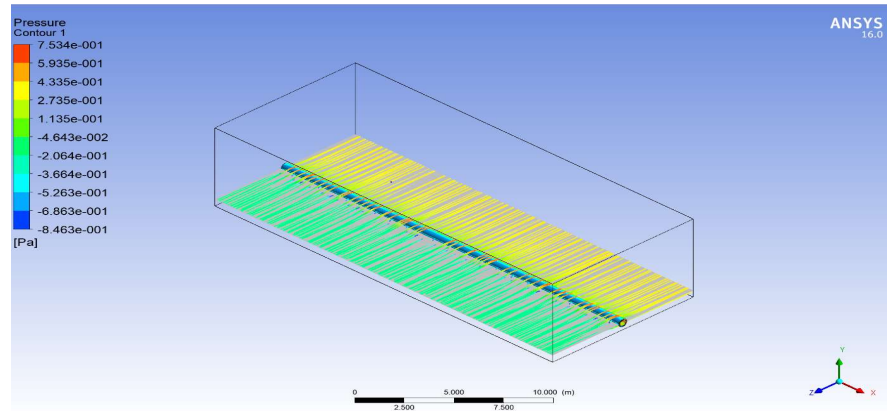
4. Langkah berikutnya adalah pemberian batas – batas analisis pada model geometri. Untuk kondisi batas *inlet* diberikan nilai kecepatan arus sebesar 1,0302 m/s (sesuai kondisi untuk 100 tahunan), sedangkan *output* diberi luaran *pressure* 0 MPa. Hal ini dimaksudkan untuk melihat *pressure* yang terjadi di dalam pipa. Sedangkan untuk sisi – sisi domain yang lain, diberikan *boundary condition* berupa *wall*. Setelah itu dipindahkan ke ANSYS Solver Manager agar bisa di *running* sesuai dengan input yang diberikan. Pemberian *Boundary Condition* pada model ditampilkan pada Gambar 4.7



Gambar 4. 7 Pemberian *Boundary Condition* pada Model

4.10.3 Hasil Permodelan ANSYS CFX

Hasil Permodelan pada ANSYS CFX yang diperoleh memperlihatkan bentuk interaksi antara aliran fluida arus yang terjadi di depan dan belakang pipa seperti ditampilkan pada Gambar 4.8 berikut



Gambar 4. 8 Hasil Permodelan ANSYS CFX pada Model *Free Span*

Arah aliran yang menabrak *free span* ini berbentuk *streamline* sesuai bentuk geometri pipa. Tetapi untuk daerah di belakang arus mengalami sedikit *vortex*. Adapun hasil yang *output* dari CFX sebenarnya bermacam – macam, beberapa diantaranya adalah nilai *pressure* akibat dari aliran arus yang menabrak sebesar 0,753 Pa. Nilai ini nanti diinput kedalam ANSYS *static structural*.

4.10.4 ANSYS *Static Structural*

Permodelan dengan menggunakan ANSYS *static structural* memiliki tujuan untuk mendapatkan tegangan ekuivalen atau tegangan *von mises*. Hasil tegangan yang diperoleh nanti diperlukan untuk validasi terhadap perhitungan tegangan ekuivalen yang sudah dihitung secara manual dan untuk memvisualisasikan tegangan ekuivalen pada pipa yang ditinjau.

4.10.5 Penggambaran Model ANSYS *Static Structural*

1. Permodelan

Struktur input data untuk pemodelan struktur meliputi panjang aktual pipa maksimal yang memenuhi *screening* kelelahan, diameter luar dari struktur pipa, tebal nominal, massa jenis struktur pipa,

modulus Young, koefisien *thermal expansion*, SMYS dan SMTS sesuai dengan data yang telah diketahui pada subbab sebelumnya. Hasil permodelan dari ANSYS CFX yang telah dilakukan sebelumnya juga diinput ke dalam permodelan.

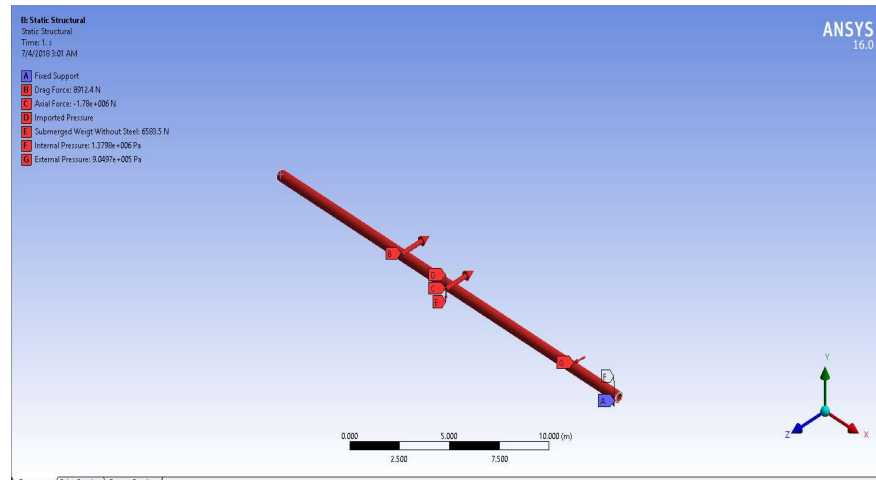
2. Input Beban Pada Model

Beban yang diinput merupakan beban – beban yang mempengaruhi besarnya tegangan ekuivalen dan nilainya berasal dari perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Berikut beberapa data input pembebanan yang dilakukan pada ANSYS *static structural* ditampilkan pada Tabel 4.52

Tabel 4. 52 Input Pembebanan pada ANSYS

Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Gaya Aksial Efektif	S_{eff}	$-1,78 \times 10^6$	N
Gaya <i>Drag</i>	F_D	8912,4	N/m
Tekanan Internal	P_i	$1,3798 \times 10^6$	Pa
Tekanan Eksternal	P_e	$9,0497 \times 10^5$	Pa
Berat Terendam Pipa	W_{sub}	6583,5	N

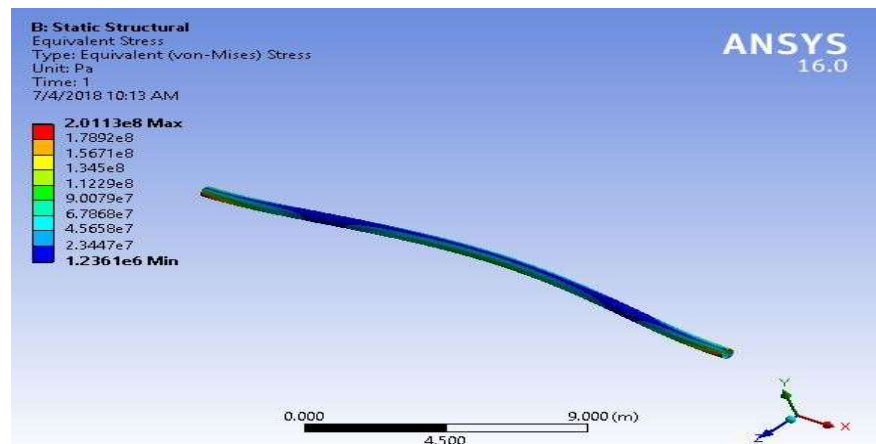
Besarnya beban yang diinput beserta arah pembebanannya sesuai dengan beban yang terjadi secara aktual agar hasil analisis yang didapatkan sesuai. *Boundary condition* yang digunakan pada permodelan ini adalah *fixed-fixed*. Arah dan pembebanan yang telah diinput pada ANSYS *static structural* ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 9 Distribusi Pembebanan dengan beban kombinasi

3. Hasil Tegangan Ekuivalen (*Von-Mises*)

Output Solution yang dipilih dalam menentukan *output software* adalah *equivalent stress* (*von mises stress*). Nilai yang ditampilkan berupa nilai range tegangan yang diterima pada struktur pipa, terdapat juga nilai maksimal dan minimal. Gambar *Solution Output* yang dikeluarkan ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 10 Hasil tegangan *von-mises* dengan *software*

Dari *software* didapatkan nilai tegangan *von-mises* maksimal adalah 2.011E+08 Pa atau 201 MPa. Nilai tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan manual (203 MPa).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari proses analisis yang telah dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Bentangan bebas pipa yang tidak memenuhi kriteria *screening fatigue* menurut DNV RP F105 sebanyak 4 bentangan dari 15 yang ditinjau di dalam tugas akhir ini. Bentangan yang tidak memenuhi kriteria, tidak dianalisis lebih lanjut dan direkomendasikan untuk dilakukan mitigasi.
2. Nilai tegangan ekuivalen (*Von Mises*) yang diperoleh pada setiap *span* yang ditinjau hasil *screening criteria fatigue* berada pada rentang 206,47 MPa – 218,80 Mpa. Untuk nilai tegangan ekuivalen terbesar, terjadi pada *span* dengan panjang aktual 7 m dan *gap* 1 m sebesar 218,80 MPa dengan rasio 0,54 terhadap *Allowable stress* ASME B3.18. Dan nilai tegangan ekuivalen terkecil terjadi pada *span* dengan panjang aktual 24 m dan *gap* 0,2 sebesar 206,47 MPa dengan rasio 0,51 terhadap *Allowable stress* ASME B3.18.
3. Berdasarkan *fatigue analysis* yang telah dilakukan, didapatkan kisaran nilai *fatigue life* untuk gerakan *in-line* antara 44,9 tahun – 56,2 tahun, sedangkan untuk gerakan *cross-flow* antara 41,9 tahun - 62,9 tahun. Jika dibandingkan dengan *design life*, maka 11 bentangan yang dianalisis masih dikatakan aman untuk beroperasi karena memiliki nilai *fatigue life* diatas *design life*. Dan nilai *fatigue life* terkecil sebesar 41 tahun ada pada *span* 24 m dengan *gap* 0,24 untuk arah *In-line*.

5.2 Saran

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa kekurangan di dalamnya, sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan ke depannya.

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai masukan dalam penelitian lanjutan ke depannya antara lain :

1. Analisis bentangan bebas dapat dilakukan kembali dengan menambahkan analisis pada *freecspan* dengan mempertimbangkan *scouring* dan beban gempa.
2. Analisis bentangan bebas dapat dilakukan dengan asumsi jenis *multispan* dengan data data yang lebih mendukung pada *span* aktual nya.
3. Analisis bentangan bebas dapat dilengkapi dengan menambahkan analisis *local buckling* yang terjadi pada pipa.
4. Pada penentuan sisa umur kelelahan bentangan bebas pipa dilakukan menggunakan *stress range* dari *response model* yaitu *VIV amplitude stress*. Sedangkan perhitungan beban yang lain tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menghitung umur kelelahan akibat beban lingkungan lainnya.
5. Perlu adanya perhitungan dari dimensi *support* untuk tiap *span* yang mengalami kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arif, A. 2008. **Analisis Free Span Untuk Pipeline di Bawah Laut**. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Kelautan FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- ASME B31.8: *Gas Transmission and Distribution Piping System*. American Steel Mechanical Engineering, America
- Bai, Yong dan Qiang Bai. 2005. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing Elsevier.
- Bai, Yong. 2001. **Pipeline and Riser**. Oxford, UK: Elsevier.
- Basir, I.A.M. 2015. **Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh Vortex Induced Vibration yang Terjadi pada Lokasi Crossing Pipelines Studi Kasus : Kilo Field Milik Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Braestrup, M. W. (2005). **Design and Installation of Marine Pipelines**. UK : Blackwell Science Ltd.
- Choi, H. S. 2000. **Free Spanning Analysis of Offshore Pipelines**. Pergamon Journal of Ocean Engineering 28 : 1325-1338.
- Djarmiko, Eko B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. Surabaya : itspress.
- DNV OS F101. 2013. **Submarine Pipeline System**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV RP C205. 2010. **Environmental Conditions and Environmental Loads**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- DNV RP F105. 2006. **Free Spanning Pipeline**. Recommended Practice. Det Norske Veritas.
- Febrian, Dian. 2013. **Perbandingan Analisa Free Span Menggunakan DNV RP F-105 “Freespanning Pipeline” dengan DNV 1981 “Rule For**

Submarine Pipelines System". Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Guo, Boyun, S. Song, Chako. J, dan Ali Ghalambor. 2005. **Offshore Pipeline**. New York: Elsevier.

Kenny, J. P. dkk. 1993. **Structural Analysis of Pipeline Spans**. Sheffield : Health and Safety Executive-Offshore Technology Information.

Mouselli, A. H. (1981). **Offshore Pipeline Design, Analysis and Methods**. Oklahoma : PennWell Books.

Putra, S.A. 2014. **Studi Kasus Analisa Vortex Induced Vibration pada Freespan Pipa Pertamina Hulu Energi-Offshore North West Java**. Tugas Akhir. Departemen Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Surabaya : Airlangga University Press

LAMPIRAN A

**PERHITUNGAN DIMENSI, MASSA
EFEKTIF DAN BERAT PIPA TERENDAM**

LAMPIRAN A

A.1 Perhitungan Dimensi Pipa

1. Diameter Dalam Pipa (D_i)

$$\begin{aligned} D_i &= D_0 - 2t_{\text{nom}} \\ &= 0,4572 - 2(0,0127) &= 0,432 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Diameter Total Pipa (D_t)

$$\begin{aligned} D_t &= D_0 + 2t_{\text{cc}} + 2t_{\text{ac}} \\ &= 0,4572 + 2(0,04) + 2(0,006) &= 0,549 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Diameter Lapisan Anti Korosi (D_{cc})

$$\begin{aligned} D_{\text{cc}} &= D_0 + 2t_{\text{cc}} \\ &= 0,4572 + 2(0,006) &= 0,469 \text{ m} \end{aligned}$$

4. Diameter Lapisan *Concrete* (D_{conc})

$$\begin{aligned} D_{\text{conc}} &= D_0 + 2(t_{\text{nom}} + t_{\text{cc}}) \\ &= 0,4572 + 2(0,006 + 0,04) &= 0,549 \text{ m} \end{aligned}$$

5. Luas Internal Pipa (A_i)

$$\begin{aligned} A_i &= \pi \frac{D_i^2}{4} \\ &= 3,14 \times 0,432^2 / 4 &= 0,146 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

6. Luas Pipa Lapisan Baja (A_{st})

$$\begin{aligned} A_{\text{st}} &= \left(\frac{\pi}{4} D_0^2 \right) - A_i \\ &= (3,14/4 \times 0,4572^2) - 0,146 &= 0,018 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

7. Luas Pipa Lapisan Anti Korosi (A_{cc})

$$A_{cc} = \left(\frac{\pi}{4} D_{ac}^2 \right) - A_i - A_{st}$$

$$= (3,14/4 \times 0,469^2) - 0,146 - 0,018 = 0,009 \text{ m}^2$$

8. Luas Pipa Lapisan *Concrete* (A_{conc})

$$A_{conc} = \left(\frac{\pi}{4} D_{cc}^2 \right) - A_i - A_{st} - A_{cc}$$

$$= (3,14/4 \times 0,469^2) - 0,146 - 0,018 - 0,009 = 0,064 \text{ m}$$

Tabel A.1 Perhitungan Properti Pipa

Parameter	Nilai	Satuan
Diameter Dalam Pipa	0.432	m
Diameter Total Pipa	0.549	m
Diameter Lapisan Anti Korosi	0.469	m
Diameter Lapisan <i>Concrete</i>	0.549	m
Luas Internal Pipa	0.146	m ²
Luas Pipa Lapisan Baja	0.018	m ²
Luas Pipa Lapisan Anti Korosi	0.009	m ²
Luas Pipa Lapisan <i>Concrete</i>	0.064	m ²
Momen Inersia Pipa Baja	4.38E-04	m ⁴
Momen Inersia Selimut Beton	2.09E-03	m ⁴

A.2 Perhitungan Massa Efektif & Berat Pipa Terendam

1. Perhitungan Massa Pipa di Udara

a. Massa Struktur Pipa Baja (M_{st})

$$M_{st} = A_{st} \times \rho_{st}$$

$$= 0,018 \times 7850 = 139,218 \text{ Kg/m}$$

b. Massa Lapisan Pipa Anti Korosi (M_{cc})

$$M_{cc} = A_{cc} \times \rho_{cc}$$

$$= 0,009 \times 1300 = 11,350 \text{ Kg/m}$$

c. Massa Lapisan *Concrete* (M_{cc})

$$\begin{aligned} M_{conc} &= A_{conc} \times \rho_{conc} \\ &= 0,064 \times 3043 = 194,715 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

d. Massa Konten Pipa (M_{fluida})

$$\begin{aligned} M_{fluida} &= A_i \times \rho_{fluida} \\ &= 0,146 \times 60 = 8,786 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

Tabel A.2 Perhitungan Massa Pipa di Udara

Perhitungan Massa Pipa di Udara		
Parameter	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	8.786	Kg/m
Massa Pipa Baja	139.218	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	11.350	Kg/m
Massa Lapisan <i>Concrete</i>	194.715	Kg/m
Total	354.070	Kg/m

2. Perhitungan Berat Terendam Pipa

a. Massa Struktur Pipa (M_{str})

$$\begin{aligned} M_{str} &= m_{st} + m_{cc} + m_{conc} \\ &= 139,218 + 11,350 + 230,321 = 380,890 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

b. Massa *Displacement* (M_{disp})

$$\begin{aligned} M_{disp} &= \frac{\pi}{4} \times D_t^2 \times \rho_w \\ &= 3,14/4 \times 0,549^2 \times 1025 = 242,815 \text{ Kg/m} \end{aligned}$$

c. Gaya *Bouyancy* (F_b)

$$F_b = m_{disp} \times g$$

$$= 242,815 \times 9,81 \qquad \qquad \qquad = 2382.011 \text{ N/m}$$

d. Berat Terendam Pipa (W_{sub})

$$\begin{aligned} W_{\text{sub}} &= (m_{\text{str}} + m_{\text{fluida}})g - F_b \\ &= (380,890 + 8,786) 9,81 - 2382.011 = 1440,710 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Tabel A.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Perhitungan Berat Terendam Pipa		
Parameter	Nilai	Satuan
Massa Konten Pipa	8.786	Kg/m
Massa Pipa Baja	139.218	Kg/m
Massa Lapisan Anti Korosi	11.350	Kg/m
Massa Lapisan <i>Concrete</i>	194.715	Kg/m
Massa Struktur Pipa	345.284	Kg/m
Massa <i>Bouyancy</i>	242.815	Kg/m
Gaya Apung	2382.011	N/m
Berat Terendam Pipa	1091.415	N/m

3. Perhitungan Massa Efektif Pipa

a. Koefisien Massa Tambah (C_a)

$$C_a = \begin{cases} 0,68 + \frac{1,6}{1+5\left(\frac{e}{Dt}\right)} & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \left(\frac{e}{Dt}\right) > 0.8 \end{cases}$$

$$e/dt = 1/0.549 = 1.82 \text{ maka } C_a = 1$$

b. Massa Tambah Pipa (M_{add})

$$\begin{aligned} M_{\text{add}} &= M_{\text{bouy}} \times C_a \\ &= 242,815 \times 1 \qquad \qquad \qquad = 242,815 \text{ Kg} \end{aligned}$$

c. Massa Efektif Pipa Terendam (M_{eff})

$$M_{\text{eff}} = M_{\text{str}} + M_{\text{fluida}} + M_{\text{add}}$$

$$= 345,384 + 8,786 + 242,815 = 596,885 \text{ Kg}$$

Untuk nilai massa efektif pada tiap – tiap span lainnya ditampilkan pada Tabel A4 berikut

Tabel A.4 Perhitungan Massa Efektif Pipa

Perhitungan Massa Efektif						
Panjang Span	Gap (e)	Rasio e/Dt	Ca	Massa Bouyancy	Massa tambah	Massa Efektif
7	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
11	0.3	0.546	1.109	242.815	269.236	623.306
12	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
14	3	5.462	1.000	242.815	242.815	596.885
15	2	3.642	1.000	242.815	242.815	596.885
17	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
20	0.5	0.910	1.000	242.815	242.815	596.885
21	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
22	1	1.821	1.000	242.815	242.815	596.885
24	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911
24	0.2	0.437	1.182	242.815	287.093	641.163
24	0.3	0.455	1.168	242.815	283.703	637.773
34	0.3	0.546	1.109	242.815	269.236	623.306
36	0.1	0.182	1.518	242.815	368.475	722.545
36	0.2	0.364	1.247	242.815	302.841	656.911

LAMPIRAN B

PERHITUNGAN KECEPATAN PARTIKEL
AIR (ARUS DAN GELOMBANG)

LAMPIRAN B

B.1 Perhitungan Kecepatan Arus Akibat Gelombang

a. Data Gelombang

Tabel B.1 Data Gelombang

Data Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	108		m
Tinggi Gelombang Signifikan	H_s	3.1	6	s
Periode Gelombang Signifikan	T_s	5	9.2	s

b. Parameter Spektra JONSWAP

1) Fungsi Distribusi (φ)

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

2) *Peak Enhancement Factor* (γ)

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

3) Konstanta *Generalised Phillips*

$$\alpha = \frac{5}{16} \frac{H_s^2 \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

Tabel B.2 Parameter Spektra JONSWAP

Parameter JONSWAP				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
tinggi gelombang signifikan	H_s	3.1	6	m
periode gelombang signifikan	T_s	5	9.2	s
periode gelombang signifikan	ω_s	1.26	0.68	rad/s
percepatan gravitasi	g	9.81		m/s
periode puncak gelombang	T_p	8.10	12.40	s
frekuensi puncak gelombang	ω_p	0.78	0.51	rad/s
fungsi distribusi	ϕ	4.600	5.062	
<i>peakedness parameter</i>	γ	1.00	1.00	
<i>konstanta generalised philips</i>	α	0.01130	0.00771	

c. Menentukan Angka Gelombang

$$k_w \cdot h = \frac{\omega^2 \cdot h}{g} \coth(k_w \cdot h)$$

Tabel B.3 Perhitungan Angka Gelombang 1 Tahun

Menentukan Angka Gelombang 1 tahun								
k_w asumsi	h	g	ω	$k_w h$	\tanh $k_w h$	\coth $k_w h$	k	error
0.06450	108	9.81	0.78	6.96600	1.00000	1.00000	0.06134	5.15702%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62438	1.00000	1.00000	0.06134	0.00017%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%

0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%
0.06134	108	9.81	0.78	6.62439	1.00000	1.00000	0.06134	0.00000%

Tabel B.4 Perhitungan Angka Gelombang 100 Tahun

Menentukan Angka Gelombang 100 tahun								
k_w asumsi	h	g	ω	$k_w h$	\tanh $k_w h$	\coth $k_w h$	k	error
0.01260	108	9.81	0.51	1.36080	0.87658	1.14080	0.02986	0.57800
0.02986	108	9.81	0.51	3.22463	0.99684	1.00317	0.02626	0.13720
0.02626	108	9.81	0.51	2.83560	0.99314	1.00691	0.02635	0.00372
0.02635	108	9.81	0.51	2.84618	0.99328	1.00677	0.02635	0.00014
0.02635	108	9.81	0.51	2.84577	0.99327	1.00677	0.02635	0.00001
0.02635	108	9.81	0.51	2.84579	0.99327	1.00677	0.02635	0.00000
0.02635	108	9.81	0.51	2.84578	0.99327	1.00677	0.02635	0.00000
0.02635	108	9.81	0.51	2.84578	0.99327	1.00677	0.02635	0.00000

Tabel B.5 Angka Gelombang 1 & 100 Tahun

Angka Gelombang				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Angka gelombang	k	0.161	0.048	-

d. Menghitung Spektra Gelombang (JONSWAP)

- Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

- Fungsi Transfer G

$$G(\omega) = \frac{\omega \cosh(k_w(D_t + e))}{\sinh(k_w \cdot h)}$$

- First Order Wave Theory

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

- Spektra JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)}$$

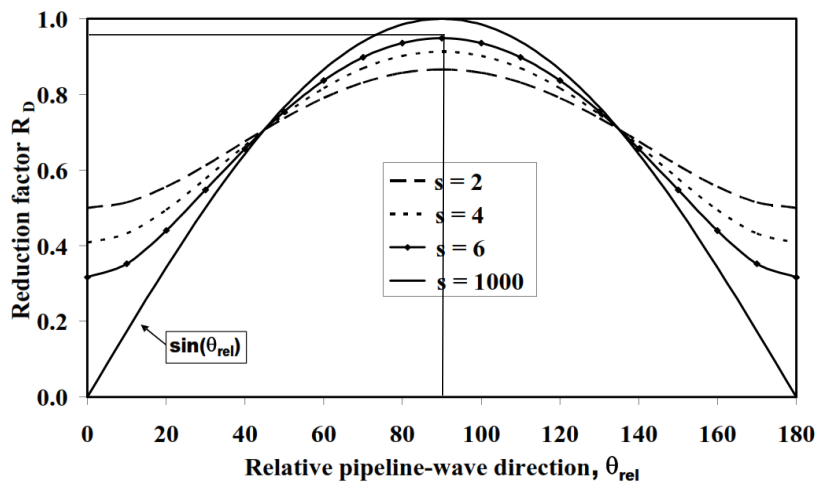
- e. Kecepatan Arus Signifikan Pada Elevasi Pipa (U_s)

$$U_s = 2\sqrt{M_0}$$

- f. Mean Zero up-crossing Period (T_u)

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}}$$

- g. Menentukan nilai R_D



- h. Kecepatan Arus Signifikan Normal Pada Pipa (U_w)

$$U_w = U_s \cdot R_D$$

Tabel B.6 Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang sesuai dengan gap aktual

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 0,1				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.20E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 0,2				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.20E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 0,24				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s

<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.20E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,25$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	5.17E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 0,3$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.20E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 0,5				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.20E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 1				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.21E-03	0.18	m/s

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang e = 2				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.19	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-

kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.24E-03	0.18	m/s
--	-------	----------	------	-----

Hasil Kecepatan Arus Akibat Gelombang $e = 3$				
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
kecepatan arus signifikan pada elevasi pipa	U_s	0.00	0.05	m/s
<i>mean zero up-crossing period</i>	T_u	3.98	3.97	s
<i>reduction factor</i>	R_D	0.95		-
kecepatan arus signifikan normal pada pipa	U_w	4.29E-03	0.04	m/s

B.2 PERHITUNGAN KECEPATAN ARUS *STEADY* DI LOKASI PIPA

Tabel B.7 Data Arus

Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kedalaman	h	90		m
Kecepatan Arus di bottom	$U(z_r)$	0.7	0.9	m/s

Tabel B.8 Parameter Perhitungan Kecepatan Arus *Steady* pada Elevasi Pipa

Parameter Kecepatan Arus pada Elevasi Pipa			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa	D_t	0.5492	m
Diameter luar pipa baja	D_0	0.4572	m
Arah aliran arus	θ_{rel}	90	°

1. *Reduction Factor* (R_c)

$$R_c = \sin(\vartheta_{rel}) = \sin(90^\circ) = 1,00$$

2. Elevasi Di atas Dasar Laut (z)

$$z = e + \frac{D_t}{2} = 0,1 + (0,549/2) = 0,3746$$

3. Parameter Kekasaran Dasar Laut (Z_0)

Data tanah di lokasi pipa adalah *fine to medium loose sand*. Nilai *seabed roughness* yang dipilih adalah *medium sand*.

Tabel B.9 Nilai *seabed roughness* sesuai DNV RP F105

<i>Seabed</i>	<i>Roughness z_0 (m)</i>
Silt	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
fine sand	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
coarse sand	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

$$Z_0 = 4 \times 10^{-5} \text{ m}$$

4. Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa (U_c)

$$U_{c, 1\text{tahun}} = R_c \times U_{(Z_r)1\text{tahun}} \times \frac{(\ln(Z_b) - \ln(Z_0))}{(\ln(Z_r) - \ln(Z_0))}$$

$$U_{c, 100\text{tahun}} = R_c \times U_{(Z_r)100\text{tahun}} \times \frac{(\ln(Z_b) - \ln(Z_0))}{(\ln(Z_r) - \ln(Z_0))}$$

Tabel B.10 Nilai Parameter & Perhitungan Kecepatan Arus di Setiap *Span*

Perhitungan Kecepatan Arus Pada Elevasi Pipa								Kecepatan Arus	
Panjang Span Aktual	Gap	kecepatan arus pada ketinggian refrensi, 1 tahun $U(z_r)$	kecepatan arus pada di ketinggian refrensi, 100 tahun $U(z_r)$	faktor reduksi	Elevasi diatas dasar laut	parameter kekasaran dasar laut	tinggi refrensi	1 tahun	100 tahun
m	m	m/s	m/s	-	m	m	m	m/s	m/s
7	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
12	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
36	0.1	0.7	0.9	1	0.375	4.00E-06	1	0.645	0.829
14	3	0.7	0.9	1	3.275	4.00E-06	1	0.767	0.986
15	2	0.7	0.9	1	2.275	4.00E-06	1	0.746	0.960
17	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
22	1	0.7	0.9	1	1.275	4.00E-06	1	0.714	0.918
36	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
24	0.25	0.7	0.9	1	0.525	4.00E-06	1	0.664	0.853
24	0.24	0.7	0.9	1	0.515	4.00E-06	1	0.663	0.852
21	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846
20	0.5	0.7	0.9	1	0.775	4.00E-06	1	0.686	0.882
11	0.3	0.7	0.9	1	0.575	4.00E-06	1	0.669	0.860
34	0.3	0.7	0.9	1	0.575	4.00E-06	1	0.669	0.860
24	0.2	0.7	0.9	1	0.475	4.00E-06	1	0.658	0.846

B.3 PERHITUNGAN KECEPATAN ARUS TOTAL

Nilai Kecepatan arus total merupakan hasil penjumlahan dari kecepatan arus akibat gelombang (U_w) dan kecepatan arus pada elevasi pipa (U_c).

Tabel B.11 Nilai Kecepatan Arus Total

Perhitungan Kecepatan Arus Total							
Panjang Span	gap (e)	Uc		Uw		Kecepatan Arus Total	
		1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun	1 tahun	100 tahun
7	1	0.7137	0.9176	4.21E-03	0.1843	0.7179	1.1019
11	0.3	0.6580	0.8460	4.20E-03	0.1842	0.6622	1.0302
12	0.2	0.6447	0.8289	4.20E-03	0.1842	0.6489	1.0131
14	3	0.7668	0.9859	4.29E-03	0.1849	0.7711	1.1708
15	2	0.7463	0.9595	4.24E-03	0.1845	0.7505	1.1441
17	1	0.7137	0.9176	4.21E-03	0.1843	0.7179	1.1019
20	0.5	0.7137	0.9176	4.20E-03	0.1842	0.7179	1.1017
21	0.2	0.6580	0.8460	4.20E-03	0.1842	0.6622	1.0302
22	1	0.6637	0.8533	4.21E-03	0.1843	0.6679	1.0376
24	0.2	0.6626	0.8519	4.20E-03	0.1842	0.6668	1.0361
24	0.24	0.6580	0.8460	4.20E-03	0.1842	0.6622	1.0302

24	0.25	0.6856	0.8815	5.17E-03	0.1842	0.6908	1.0657
34	0.3	0.6688	0.8599	4.20E-03	0.1842	0.6730	1.0441
36	0.1	0.6688	0.8599	4.20E-03	0.1842	0.6730	1.0440
36	0.2	0.6580	0.8460	4.20E-03	0.1842	0.6622	1.0302

LAMPIRAN C

PERHITUNGAN GAYA HIDRODINAMIS

LAMPIRAN C

C.1 GAYA DRAG

Tabel C.1 Parameter Awal Koefisien Drag

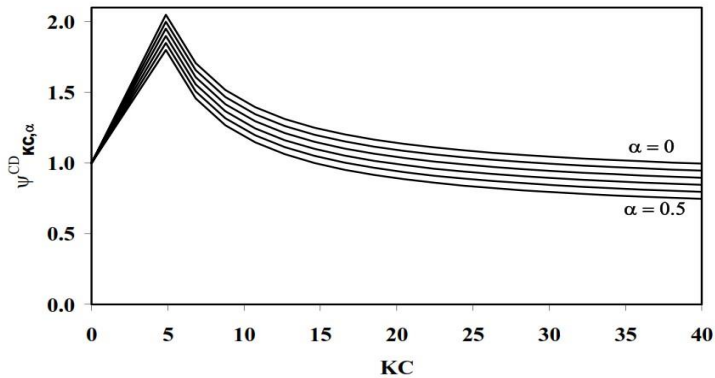
Parameter	Notasi	Nilai		Satuan
		1 Tahun	100 Tahun	
Kekasaran permukaan pipa	k	0.003		m
Diameter total pipa	D _t	0.549		m
Rasio k/ D _t	k/D _t	0.006		-
periode gelombang signifikan	ω _s	5.00	9.20	rad/s

a. Koefisien Drag Dasar Untuk Aliran *Steady* $\left(C_D^0 \left(\frac{k}{D_t}\right)\right)$

$$C_D^0 \left(\frac{k}{D_t}\right) \begin{cases} 0,65 & ; \left(\frac{k}{D_t}\right) < 10^{-4} \text{ (smooth)} \\ 0,65 \left(\frac{29}{13} + \frac{4}{13} \log_{10} \left(\frac{k}{D_t}\right)\right) & ; 10^{-4} < \left(\frac{k}{D_t}\right) < 10^{-2} \\ 1,05 & ; \left(\frac{k}{D_t}\right) < 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases}$$

b. Faktor Koreksi Untuk Aliran *Unsteady* ($\psi_{KC,\alpha}^{CD}$)

$$\psi_{KC,\alpha}^{CD} = \begin{cases} 0,85 + \frac{6}{KC} - \frac{\alpha}{2} & \alpha \leq 0,5 \\ 0,6 + \frac{6}{\sqrt{\alpha}} & \alpha \geq 0,5 \end{cases} \quad 5 < KC < 40$$



c. Faktor Koreksi Perkiraan Kondisi Dasar Laut (ψ_{proxi}^{CD})

$$\psi_{proxi}^{CD} = \begin{cases} 0,9 + \frac{0,5}{\left(1 + 5 \cdot \frac{e}{D_t}\right)} - \frac{\alpha}{2} & \text{untuk } \frac{e}{D_t} < 0,8 \\ 1 & \text{lainnya} \end{cases}$$

d. Faktor Koreksi Akibat Pengaruh *Trench* (ψ_{trench}^{CD})

$$(\psi_{trench}^{CD}) = 1 \text{ (tanpa trench)}$$

e. Faktor Amplifikasi Akibat Getaran *Cross-flow* (ψ_{VIV}^{CD})

$$\psi_{VIV}^{CD} = 1 + 1.043 \left(\sqrt{2} \frac{A_z}{D_t} \right)^{0,65}$$

Tabel C.2 Nilai Az/D

KC		Current flow ratio	Rasio e/dt	VRCFonset	Az/D
1 Tahun	100 Tahun				
1.53E-03	0.036	0.995	1.821	2.500	0.0714
1.53E-03	0.036	0.995	0.546	2.341	0.0669
1.53E-03	0.036	0.995	0.364	2.228	0.0636
1.56E-03	0.037	0.996	5.462	2.500	0.0714
1.55E-03	0.037	0.996	3.642	2.500	0.0714
1.53E-03	0.036	0.995	1.821	2.500	0.0714
1.53E-03	0.036	0.995	0.910	2.500	0.0714
1.53E-03	0.036	0.995	0.364	2.228	0.0636
1.53E-03	0.036	0.995	1.821	2.500	0.0714
1.53E-03	0.036	0.995	0.364	2.228	0.0636
1.53E-03	0.036	0.995	0.437	2.273	0.0649
1.88E-03	0.036	0.994	0.455	2.285	0.0652
1.53E-03	0.036	0.995	0.546	2.341	0.0669
1.53E-03	0.036	0.995	0.182	2.114	0.0604
1.53E-03	0.036	0.995	0.364	2.228	0.0636

Tabel C.3 Nilai C_D

Koefisien Drag							
Length	Gap	C_D^0	$\Psi_{KC,\alpha}^{CD}$	Ψ_{proxi}^{CD}	Ψ_{trench}^{CD}	Ψ_{VIV}^{CD}	C_D
7	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
11	0.3	1.007	1	1.034	1	1.225	1.275
12	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
14	3	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
15	2	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
17	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
20	0.5	1.007	1		1	1.235	1.243
21	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
22	1	1.007	1	1.000	1	1.235	1.243
24	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321
24	0.24	1.007	1	1.057	1	1.221	1.299
24	0.25	1.007	1	1.053	1	1.222	1.294
11	0.3	1.007	1	1.034	1	1.225	1.275
34	0.1	1.007	1	1.162	1	1.211	1.416
21	0.2	1.007	1	1.077	1	1.218	1.321

Tabel C.4 Parameter Perhitungan Gaya Drag

PARAMETER GAYA DRAG			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_t	0.5492	m

f. Perhitungan Gaya Drag

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w \cdot D_t \cdot C_D \cdot (U_w + U_c)^2$$

Tabel C.5 Gaya Drag

GAYA DRAG				
No.	Length	U_{tot}	C_D	F_D
1	7	1.102	1.243	424.798
2	11	1.030	1.275	371.353
3	12	1.013	1.321	359.097
4	14	1.171	1.243	479.648
5	15	1.144	1.243	457.960
6	17	1.102	1.243	424.798
7	20	1.102	1.243	424.711
8	21	1.030	1.321	371.346
9	22	1.038	1.243	376.678
10	24	1.036	1.321	375.582
11	24	1.030	1.299	371.349
12	24	1.066	1.294	397.362
13	34	1.044	1.275	381.402
14	36	1.044	1.416	381.388
15	36	1.030	1.321	371.346

C.2 GAYA LIFT**Tabel C.6 Parameter & Perhitungan Koefisien Lift**

PARAMETER KOEFISIEN LIFT					
L	e	Re		C_L	
		1 Tahun	100 Tahun	1 Tahun	100 Tahun
7.00	1.00	386527.33	593270.81	0.70	0.70
11.00	0.30	356562.77	554696.33	0.70	0.70
12.00	0.20	349387.06	545465.78	0.70	0.70
14.00	3.00	415183.33	630409.55	0.70	0.70
15.00	2.00	404107.51	615992.59	0.70	0.70
17.00	1.00	386527.33	593270.81	0.70	0.70
20.00	0.50	386521.81	593210.18	0.70	0.70

21.00	0.20	356562.09	554690.83	0.70	0.70
22.00	1.00	359607.26	558659.29	0.70	0.70
24.00	0.20	359015.83	557845.63	0.70	0.70
24.00	0.24	356562.36	554692.95	0.70	0.70
24.00	0.25	371938.23	573792.64	0.70	0.70
34.00	0.30	362360.75	562150.88	0.70	0.70
36.00	0.10	362359.48	562140.56	0.70	0.70
36.00	0.20	356562.09	554690.83	0.70	0.70

Tabel C.7 Parameter Gaya Lift

GAYA Lift			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Densitas Air Laut	ρ_w	1025	kg/m ³
Diameter Total Pipa	D_t	0.5492	m
Koefisien Lift	C_L	0.70	-

Tabel C.8 Perhitungan Gaya Lift

GAYA LIFT							
L	e	U _{tot}		C _L		FL	
		1 Tahun	100 Tahun	1 Tahun	100 Tahun	1 Tahun	100 Tahun
7.00	1.00	0.718	1.102	0.700	0.700	101.536	239.204
11.00	0.30	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.109
12.00	0.20	0.649	1.013	0.700	0.700	82.961	202.207
14.00	3.00	0.771	1.171	0.700	0.700	117.150	270.089
15.00	2.00	0.751	1.144	0.700	0.700	110.983	257.877
17.00	1.00	0.718	1.102	0.700	0.700	101.536	239.204
20.00	0.50	0.718	1.102	0.700	0.700	101.534	239.155

21.00	0.20	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.105
22.00	1.00	0.668	1.038	0.700	0.700	87.886	212.107
24.00	0.20	0.667	1.036	0.700	0.700	87.597	211.490
24.00	0.24	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.106
24.00	0.25	0.691	1.066	0.700	0.700	94.016	223.754
34.00	0.30	0.673	1.044	0.700	0.700	89.237	214.767
36.00	0.10	0.673	1.044	0.700	0.700	89.236	214.759
36.00	0.20	0.662	1.030	0.700	0.700	86.404	209.105

Tabel C.9 Perhitungan Gaya Hidrodinamis Total

GAYA HIDRODINAMIS TOTAL				
L	e	FD	FL	Ftot
7	1.00	424.798	239.204	664.002
11	0.30	371.353	209.109	580.462
12	0.20	359.097	202.207	561.304
14	3.00	479.648	270.089	749.737
15	2.00	457.960	257.877	715.837
17	1.00	424.798	239.204	664.002
20	0.50	424.711	239.155	663.866
21	0.20	371.346	209.105	580.451
22	1.00	376.678	212.107	588.786
24	0.20	375.582	211.490	587.072
24	0.24	371.349	209.106	580.455
24	0.25	397.362	223.754	621.117
34	0.30	381.402	214.767	596.169
36	0.10	381.388	214.759	596.147
36	0.20	371.346	209.105	580.451

LAMPIRAN D

PERHITUNGAN *DYNAMIC SOIL*
STIFFNESS* DAN *CONCRETE STIFFNESS
FACTOR

LAMPIRAN D

D.1 DYNAMIC SOIL STIFFNESS

Tabel D.1 Parameter *Dynamic Soil Stiffness*

Parameter <i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> vertikal	C_v	10500	$\text{kN/m}^{5/2}$
Koefisien <i>dynamic soil stiffness</i> horizontal	C_L	9000	$\text{kN/m}^{5/2}$
<i>Poisson ratio</i> tanah vertikal	$v_{\text{soil},V}$	0.35	-
<i>Poisson ratio</i> tanah horizontal	$v_{\text{soil},L}$	0.35	-
Massa pipa di udara	-	354,07	kg/m
Massa air yang dipindahkan	m_{disp}	242.81	kg/m
Diameter total pipa	D_t	0.549	m

- a. Rasio Massa Spesifik

$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{\text{Massa Pipa di Udara}}{m_{\text{disp}}} = \frac{354,07}{242,81} = 1,458$$

- b. *Dynamic Soil Stiffness* Vertikal

$$K_v = \frac{C_v}{1-v_{\text{soil}}} \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t}$$

- c. *Dynamic Soil Stiffness* Horizontal

$$K_L = C_L(1 + v_{\text{soil}}) \left(\frac{2}{3} \frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D_t}$$

Tabel D.2 Faktor kekakuan Horizontal dan Vertikal untuk Tanah *Sand*

<i>Sand type</i>	C_v ($\text{kN/m}^{5/2}$)	C_L ($\text{kN/m}^{5/2}$)	$K_{v,s}$ ($\text{kN/m}^3/\text{m}$)
Loose	10500	9000	250
Medium	14500	12500	530
Dense	21000	18000	1350

Tabel D.2 Nilai *Dynamic Soil Stiffness*

<i>Dynamic Soil Stiffness</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Rasio massa spesifik	ρ_s/ρ	1.605	-
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	23197.73	kN/m/m
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	17548.29	kN/m/m

D.2 CONCRETE STIFFNESS FACTOR (CSF)**Tabel E.3** Parameter Perhitungan CSF

<i>Parameter Concrete Stiffness Factor</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Konstanta empiris (asphalt)	k_c	0.33	-
Momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
Momen inersia selimut beton	I_{conc}	2.09E-03	m ⁴
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	207000	MPa
Kekuatan material selimut beton	f_{cn}	45	MPa

a. *Young's Modulus* Selimut Beton

$$E_{conc} = 1000 \times (f_{cn})^{0,3} = 1000 \times (45)^{0,3} = 31330,24$$

b. *Concrete Stiffness Factor*

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} = 0,258$$

LAMPIRAN E

PERHITUNGAN FREKUENSI NATURAL

PIPA

LAMPIRAN E

E.1 Perhitungan Parameter β

Tabel E.1 Parameter Perhitungan β

Parameter Perhitungan β			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Dynamic soil stiffness</i> vertikal	K_v	1,56E+07	N/m/m
<i>Dynamic soil stiffness</i> horizontal	K_L	1,18E+07	N/m/m
<i>Concrete Stiffness Factor</i>	CSF	0.258	-
momen inersia pipa baja	I_{st}	4.38E-04	m ⁴
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \cdot L^4}{(1 + CSF) E_{st} \cdot I_{st}} \right)$$

E.2 Panjang Efektif Bentangan Bebas Pipa

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066 \beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & \text{untuk } \beta \geq 2,7 \\ \frac{4,73}{0,036 \beta^2 + 0,61\beta + 1,0} & \text{untuk } \beta < 2,7 \end{cases}$$

Tabel E.2 Perhitungan Panjan Efektif Bentangan Bebas Pipa

Cross-Flow			
L m	β	L_{eff}/L	L_{eff} m
7.00	2.517	1.712	11.982
11.00	3.302	1.443	15.870
12.00	3.453	1.406	16.867
14.00	3.721	1.347	18.858
15.00	3.841	1.323	19.852

In-Line			
L m	β	L_{eff}/L	L_{eff} m
7.00	2.39	1.77	12.42
11.00	3.18	1.48	16.23
12.00	3.33	1.44	17.23
14.00	3.60	1.37	19.22
15.00	3.72	1.35	20.22

17.00	4.058	1.284	21.836
20.00	4.341	1.240	24.804
21.00	4.425	1.228	25.791
22.00	4.506	1.217	26.778
24.00	4.657	1.198	28.748
24.00	4.657	1.198	28.748
24.00	4.657	1.198	28.748
34.00	5.262	1.134	38.567
36.00	5.362	1.126	40.528
36.00	5.362	1.126	40.528

17.00	3.93	1.31	22.20
20.00	4.22	1.26	25.18
21.00	4.30	1.25	26.16
22.00	4.38	1.23	27.15
24.00	4.53	1.21	29.12
24.00	4.53	1.21	29.12
24.00	4.53	1.21	29.12
34.00	5.14	1.15	38.95
36.00	5.24	1.14	40.91
36.00	5.24	1.14	40.91

E.3 BOUNDARY CONDITION

Kondisi batas yang digunakan pada tugas akhir ini adalah *fixed-fixed*, maka koefisien batas sesuai dengan tabel di atas ini beserta keterangannya.

Tabel E.3 Koefisien Batas Menurut DNV RP F105

	Pinned - Pinned ²⁾	Fixed - Fixed ³⁾	Single span on seabed
C ₁	1.57	3.56	3.56
C ₂	1.0	4.0	4.0
C ₃	0.8 ¹⁾	0.2 ¹⁾	0.4 ¹⁾
C ₄	4.93	14.1	Shoulder $14.1(L/L_{eff})^2$ Mid-span : 8.6
C ₅	1/8	1/12	Shoulder: ⁴⁾ $\frac{1}{18 (L_{eff}/L)^2 - 6}$ Mid-span: 1/24
C ₆	5/384	1/384	1/384

- 1) Note that $C_3 = 0$ is normally assumed for in-line if the steady current is not accounted for.
- 2) For pinned-pinned boundary condition L_{eff} is to be replaced by L in the above expressions also for P_{cr} .
- 3) For fixed-fixed boundary conditions, $L_{eff}/L = 1$ per definition.
- 4) C_5 shall be calculated using the static soil stiffness in the L_{eff}/L calculation.

E.4 EFFECTIVE AXIAL FORCE

Tabel E.4 Parameter Perhitungan *Effective Axial Force*

Parameter Perhitungan <i>Effective Axial Force</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Perbedaan tekanan	ΔP	1.29E+07	Pa
<i>Poisson's ratio</i> baja	ν_{st}	0.3	-
diameter dalam pipa	D_i	0.432	m
luas penampang internal pipa baja	A_i	0,15	m ²
luas penampang pipa baja	A_{st}	1.773E-02	m ²
Koefisien <i>thermal expansion</i>	α_e	1.170E-05	/°C
Temperatur Operasi	T_1	48.90	°C
Temperatur air laut	T_0	25	°C
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E_{st}	2.07E+11	Pa

Perhitungn *Effective Axial Force*

$$\begin{aligned}
 S_{eff} &= H_{eff} - (1 - 2 \cdot \nu) \cdot P_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_i)^2 - \alpha_e \cdot \Delta T \cdot A_{st} \\
 &= -1,78 \times 10^6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

E.5 CRITICAL BUCKING LOAD

Tabel E.5 Parameter Perhitungan *Critical Bucking Load*

Parameter Perhitungan <i>Critical Buckling Load</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.258	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	4.38E-04	m ⁴
Boundary condition	C ₂	4	-

Perhitungn *Critical Bucking Load*

$$P_{cr} = (1 + CSF) C_2 \pi^2 \frac{E_{st} I_{st}}{L_{eff}^2}$$

Tabel E.6 *Critical Bucking Load* untuk *In-line* & *Cross-flow*

In-Line			Cross-Flow		
L	L _{eff}	P _{cr}	L	L _{eff}	P _{cr}
m	m	N	m	m	N
7.00	12.42	2.92E+07	7.00	11.98	3.14E+07
11.00	16.23	1.71E+07	11.00	15.87	1.79E+07
12.00	17.23	1.52E+07	12.00	16.87	1.58E+07
14.00	19.22	1.22E+07	14.00	18.86	1.27E+07
15.00	20.22	1.10E+07	15.00	19.85	1.14E+07
17.00	22.20	9.14E+06	17.00	21.84	9.45E+06
20.00	25.18	7.11E+06	20.00	24.80	7.33E+06
21.00	26.16	6.58E+06	21.00	25.79	6.78E+06
22.00	27.15	6.11E+06	22.00	26.78	6.29E+06
24.00	29.12	5.31E+06	24.00	28.75	5.45E+06
24.00	29.12	5.31E+06	24.00	28.75	5.45E+06
24.00	29.12	5.31E+06	24.00	28.75	5.45E+06
34.00	38.95	2.97E+06	34.00	38.57	3.03E+06
36.00	40.91	2.69E+06	36.00	40.53	2.74E+06
36.00	40.91	2.69E+06	36.00	40.53	2.74E+06

E.6 STATIC DEFLECTION

Tabel E.7 Parameter Perhitungan *Static Deflection*

Parameter Perhitungan <i>Static Deflection</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.258	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	4.38E-04	m ⁴
Boundary condition	C ₆	0.00260	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-1.78E+06	N
Berat terendam pipa (q <i>cross flow</i>)	W _{sub}	1091.42	N/m

Perhitungan *Static Deflection*

$$\delta = C_6 \frac{q \cdot L_{eff}^4}{E_{st} I_{st} \cdot (1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)}$$

Tabel E.8 Nilai *Static Deflection* arah *In-Line*

In-Line				
L	L _{eff}	P _{cr}	F _{tot}	d
m	m	N		m
7.00	12.42	2.92E+07	424.798	2.46E-04
11.00	16.23	1.71E+07	371.353	6.57E-04
12.00	17.23	1.52E+07	359.097	8.18E-04
14.00	19.22	1.22E+07	479.648	1.75E-03
15.00	20.22	1.10E+07	457.960	2.08E-03
17.00	22.20	9.14E+06	424.798	2.93E-03
20.00	25.18	7.11E+06	424.711	5.19E-03
21.00	26.16	6.58E+06	371.346	5.44E-03
22.00	27.15	6.11E+06	376.678	6.59E-03
24.00	29.12	5.31E+06	375.582	9.27E-03

24.00	29.12	5.31E+06	371.349	9.17E-03
24.00	29.12	5.31E+06	397.362	9.81E-03
34.00	38.95	2.97E+06	381.402	5.00E-02
36.00	40.91	2.69E+06	381.388	7.20E-02
36.00	40.91	2.69E+06	371.346	7.01E-02

Tabel E.9 Nilai *Static Deflection* arah *Cross-Flow*

Cross-Flow			
L	L _{eff}	P _{cr}	δ
m	m	N	m
7.00	11.98	3.14E+07	5.44E-04
11.00	15.87	1.79E+07	1.75E-03
12.00	16.87	1.58E+07	2.27E-03
14.00	18.86	1.27E+07	3.66E-03
15.00	19.85	1.14E+07	4.58E-03
17.00	21.84	9.45E+06	6.98E-03
20.00	24.80	7.33E+06	1.25E-02
21.00	25.79	6.78E+06	1.49E-02
22.00	26.78	6.29E+06	1.79E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
24.00	28.75	5.45E+06	2.53E-02
34.00	38.57	3.03E+06	1.34E-01
36.00	40.53	2.74E+06	1.91E-01
36.00	40.53	2.74E+06	1.91E-01

E.7 FREKUENSI NATURAL PIPA

Tabel E. 10 Parameter Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

Parameter Perhitungan <i>Fundamental Natural Frequency</i>			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
<i>Concrete stiffness factor</i>	CSF	0.26	-
<i>Young's modulus</i> pipa baja	E _{st}	2.07E+11	Pa
momen inersia pipa baja	I _{st}	4.38E-04	m ⁴

Boundary condition	C ₁	3.56	-
	C ₃	0.20	-
Effective Axial Force	S _{eff}	-1.78E+06	N
Diameter total pipa	D _t	0.549	m

Perhitungan Frekuensi Natural Pipa

$$f_1 \approx C_1 \sqrt{1 + CSF} \sqrt{\frac{E_{st} \cdot I_{st}}{m_e \cdot L_{eff}^4} \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}} + C_3 \left(\frac{\delta}{D_t} \right)^2 \right)}$$

Tabel E. 11 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Arah *In-Line*

In-Line					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f ₁
m	m	N	m		Hz
7	12.420	2.92E+07	2.46E-04	596.885	9.781
11	16.233	1.71E+07	6.57E-04	623.306	5.472
12	17.229	1.52E+07	8.18E-04	656.911	4.697
14	19.221	1.22E+07	1.75E-03	596.885	3.894
15	20.216	1.10E+07	2.08E-03	596.885	3.488
17	22.204	9.14E+06	2.93E-03	596.885	2.834
20	25.176	7.11E+06	5.19E-03	596.885	2.127
21	26.164	6.58E+06	5.44E-03	656.911	1.851
22	27.152	6.11E+06	6.59E-03	596.885	1.778
24	29.125	5.31E+06	9.27E-03	656.911	1.426
24	29.125	5.31E+06	9.17E-03	641.163	1.444
24	29.125	5.31E+06	9.81E-03	637.773	1.448
34	38.952	2.97E+06	5.00E-02	623.306	0.637
36	40.914	2.69E+06	7.20E-02	722.545	0.494
36	40.914	2.69E+06	7.01E-02	656.911	0.518

Tabel E. 12 Perhitungan Frekuensi Natural Pipa Arah *Cross-Flow*

Cross-Flow					
L	L _{eff}	P _{cr}	δ	me	f ₁
m	m	N	m	kg/m	Hz
7	11.982	3.14E+07	5.44E-04	596.885	10.532

11	15.870	1.79E+07	1.75E-03	623.306	5.740
12	16.867	1.58E+07	2.27E-03	656.911	4.915
14	18.858	1.27E+07	3.66E-03	596.885	4.059
15	19.852	1.14E+07	4.58E-03	596.885	3.630
17	21.836	9.45E+06	6.98E-03	596.885	2.941
20	24.804	7.33E+06	1.25E-02	596.885	2.202
21	25.791	6.78E+06	1.49E-02	656.911	1.916
22	26.778	6.29E+06	1.79E-02	596.885	1.838
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	656.911	1.474
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	641.163	1.492
24	28.748	5.45E+06	2.53E-02	637.773	1.496
34	38.567	3.03E+06	1.34E-01	623.306	0.667
36	40.528	2.74E+06	1.91E-01	722.545	0.528
36	40.528	2.74E+06	1.91E-01	656.911	0.553

LAMPIRAN F

SCREENING KRITERIA FATIGUE DAN PERHITUNGAN FATIGUE LIFE

LAMPIRAN F

F.1 SCREENING IN-LINE

Tabel F.1 Parameter *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

Parameter <i>Screening</i> Kelelahan			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa	D_t	0.549	m
<i>Safety factor in-line</i>	γ_{IL}	1.4	-

Perhitungan *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

$$\frac{f_{n,IL}}{\gamma_{IL}} > \frac{U_{c,100tahun}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \cdot \left(1 - \frac{L/D_t}{250}\right) \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Tabel F.2 Hasil *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

In-Line							
L	$f_{n, IL}$	$f_{n, IL} / \gamma_{IL}$	$V_{R, onset}^{IL}$	Uc 100 year	α	$\frac{U_{c,100tahun}}{V_{R,onset}^{IL} \cdot D_t} \square$	Kriteria
m	Hz			m/s			
7	9.781	6.986	1.217	0.918	0.995	1.309	LOLOS
11	5.472	3.909	1.246	0.846	0.995	1.143	LOLOS
12	4.697	3.355	1.284	0.829	0.995	1.078	LOLOS
14	3.894	2.782	1.217	0.986	0.996	1.331	LOLOS
15	3.488	2.492	1.217	0.960	0.996	1.285	LOLOS
17	2.834	2.024	1.217	0.918	0.995	1.209	LOLOS
20	2.127	1.519	1.217	0.918	0.995	1.179	LOLOS
21	1.851	1.322	1.284	0.846	0.995	1.021	LOLOS
22	1.778	1.270	1.217	0.853	0.995	1.078	LOLOS
24	1.426	1.019	1.284	0.852	0.995	1.002	LOLOS
24	1.444	1.031	1.267	0.846	0.995	1.009	LOLOS
24	1.448	1.034	1.263	0.882	0.994	1.055	TIDAK LOLOS
34	0.637	0.455	1.246	0.860	0.995	0.950	TIDAK LOLOS
36	0.494	0.353	1.358	0.860	0.995	0.855	TIDAK LOLOS
36	0.518	0.370	1.284	0.846	0.995	0.889	TIDAK LOLOS

F.2 SCREENING CROSS-FLOW

Tabel F.3 Parameter *Screening* Kelelahan Kondisi *Cross-Flow*

Parameter <i>Screening</i> Kelelahan			
Parameter	Notasi	Nilai	Satuan
Diameter total pipa	D_t	0.549	m
<i>Safety factor in-line</i>	γ_{CF}	1.4	-

Perhitungan *Screening* Kelelahan Kondisi *Cross-Flow*

$$\frac{f_{n,CF}}{\gamma_{CF}} > \frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}$$

Tabel F.4 Hasil *Screening* Kelelahan Kondisi *Cross-Flow*

Cross-Flow							
L	$f_{n, CF}$	$f_{n, CF} / \gamma_{CF}$	$V_{R,onset}$	Uc 100 year	Uw 1 year	$\frac{U_{c,100tahun} + U_{w,1tahun}}{V_{R,onset}^{CF} \cdot D_t}$	Kriteria
m	Hz			m/s	m/s		
7	10.532	7.523	2.500	0.918	4.21E-03	0.671	LOLOS
11	5.740	4.100	2.341	0.846	4.20E-03	0.661	LOLOS
12	4.915	3.510	2.228	0.829	4.20E-03	0.681	LOLOS
14	4.059	2.899	2.500	0.986	4.29E-03	0.721	LOLOS
15	3.630	2.593	2.500	0.960	4.24E-03	0.702	LOLOS
17	2.941	2.101	2.500	0.918	4.21E-03	0.671	LOLOS
20	2.202	1.573	2.500	0.918	4.20E-03	0.671	LOLOS
21	1.916	1.368	2.228	0.846	4.20E-03	0.695	LOLOS
22	1.838	1.313	2.500	0.853	4.21E-03	0.625	LOLOS
24	1.474	1.053	2.228	0.852	4.20E-03	0.700	LOLOS
24	1.492	1.066	2.273	0.846	4.20E-03	0.681	LOLOS
24	1.496	1.069	2.285	0.882	5.17E-03	0.707	LOLOS
34	0.667	0.476	2.341	0.860	4.20E-03	0.672	TIDAK LOLOS
36	0.528	0.377	2.114	0.860	4.20E-03	0.744	TIDAK LOLOS
36	0.553	0.395	2.228	0.846	4.20E-03	0.695	TIDAK LOLOS

F.3 UNIT STRESS AMPLITUDE

Tabel F.5 Parameter *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

Perhitungan Unit Stress Amplitude		
Parameter	Notasi	Nilai
C4	C4	14.1
Diameter total	Dt	0.5492
Diameter dalam pipa	Di	0.4572
modulus young baja	E	2.07E+11
wall thickness	t	0.0127
Concrete Stiffness Factor	CSF	0.258
<i>Safety Factor for Fatigue</i>	γ	1.3

Table 2-2 General safety factors for fatigue			
<i>Safety factor</i>	<i>Safety Class</i>		
	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
η	1.0	0.5	0.25
γ_k	1.0	1.15	1.30
γ_s	1.3		
$\gamma_{on, IL}$	1.1		
$\gamma_{on, CF}$	1.2		

$$A_{IL/CF} = C_4 (1 + CSF) \frac{D \cdot (D_s - t) \cdot E}{L_{eff}^2}$$

Tabel F.6 Unit Stress Amplitude *In-Line* & *Cross-Flow*

Cross Flow		
L aktual	L efektif	Stress Amplitude Cross-Flow
7	11.982	6.24E+09
11	15.870	3.56E+09
12	16.867	3.15E+09
14	18.858	2.52E+09

In-Line		
L aktual	L efektif	Stress Amplitude In-Line
7	12.420	5.81E+09
11	16.233	3.40E+09
12	17.229	3.02E+09
14	19.221	2.43E+09

15	19.852	2.27E+09
17	21.836	1.88E+09
20	24.804	1.46E+09
21	25.791	1.35E+09
22	26.778	1.25E+09
24	28.748	1.08E+09
24	28.748	1.08E+09
24	28.748	1.08E+09
34	38.567	6.03E+08
36	40.528	5.46E+08
36	40.528	5.46E+08

15	20.216	2.19E+09
17	22.204	1.82E+09
20	25.176	1.41E+09
21	26.164	1.31E+09
22	27.152	1.22E+09
24	29.125	1.06E+09
24	29.125	1.06E+09
24	29.125	1.06E+09
34	38.952	5.91E+08
36	40.914	5.35E+08
36	40.914	5.35E+08

F.4 STRESS RANGE

$$S_{CF} = 2 \cdot A_{CF} \cdot (A_Z/D) \cdot R_k \cdot \gamma_s \quad S_{IL} = 2 \cdot A_{IL} \cdot (A_Y/D) \cdot \psi_{\alpha,IL} \cdot \gamma_s$$

Tabel F.7 Parameter *Screening* Kelelahan Kondisi *In-Line*

<i>In-Line</i>							
Panjang span aktual (m)	Panjang span efektif (m)	<i>Stress Amplitude In-Line</i>	A _y /D	α	Ψ	<i>Stress Range</i> (Pa)	<i>Stress Range</i> (MPa)
7	12.420	5.81E+09	0.01	1.00	1	1.51E+08	1.51E+02
11	16.233	3.40E+09	0.01	1.00	1	8.84E+07	8.84E+01
12	17.229	3.02E+09	0.01	0.99	1	7.85E+07	7.85E+01
14	19.221	2.43E+09	0.01	1.00	1	6.31E+07	6.31E+01
15	20.216	2.19E+09	0.01	1.00	1	5.70E+07	5.70E+01
17	22.204	1.82E+09	0.01	1.00	1	4.73E+07	4.73E+01
20	25.176	1.41E+09	0.01	1.00	1	3.68E+07	3.68E+01
21	26.164	1.31E+09	0.01	1.00	1	3.40E+07	3.40E+01
22	27.152	1.22E+09	0.01	1.00	1	3.16E+07	3.16E+01
24	29.125	1.06E+09	0.01	1.00	1	2.75E+07	2.75E+01
24	29.125	1.06E+09	0.01	1.00	1	2.75E+07	2.75E+01

Tabel F.8 *Parameter Screening Kelelahan Kondisi Cross-Flow*

Cross Flow							
Panjang span aktual (m)	Panjang span efektif (m)	<i>Stress Amplitude Cross- Flow</i>	Az/D	Ksd	Rk	<i>Stress Range (Pa)</i>	<i>Stress Range (MPa)</i>
7	11.982	6.24E+09	0.071	0.738	0.889	1.03E+09	1.03E+03
11	15.870	3.56E+09	0.067	0.771	0.884	5.47E+08	5.47E+02
12	16.867	3.15E+09	0.064	0.813	0.878	4.58E+08	4.58E+02
14	18.858	2.52E+09	0.071	0.738	0.889	4.16E+08	4.16E+02
15	19.852	2.27E+09	0.071	0.738	0.889	3.75E+08	3.75E+02
17	21.836	1.88E+09	0.071	0.738	0.889	3.10E+08	3.10E+02
20	24.804	1.46E+09	0.071	0.738	0.889	2.40E+08	2.40E+02
21	25.791	1.35E+09	0.064	0.813	0.878	1.96E+08	1.96E+02
22	26.778	1.25E+09	0.071	0.738	0.889	2.06E+08	2.06E+02
24	28.748	1.08E+09	0.064	0.813	0.878	1.58E+08	1.58E+02
24	28.748	1.08E+09	0.065	0.793	0.881	1.61E+08	1.61E+02

F.5 FATIGUE LIFE**Tabel F.9** *Fatigue Life Kondisi In-Line*

Keadaan <i>In-line</i>					
Panjang Span Aktual	N	n	Dfat OS F101	Dfat RP F105	fatigue life
m	cycles	cycles			years
7	1.68E+05	2.10E+05	6.24E-02	1.56E-01	44.9
11	8.40E+05	8.90E+05	5.30E-02	1.33E-01	52.8
12	1.35E+06	1.60E+06	5.91E-02	1.48E-01	47.4
14	4.04E+06	4.03E+06	4.99E-02	1.25E-01	56.2
15	6.69E+06	6.90E+06	5.15E-02	1.29E-01	54.3

17	1.71E+07	1.80E+07	5.26E-02	1.32E-01	53.2
20	6.00E+07	7.30E+07	6.08E-02	1.52E-01	46.1
21	8.83E+07	9.80E+07	5.55E-02	1.39E-01	50.4
22	1.28E+08	1.60E+08	6.26E-02	1.56E-01	44.7
24	2.58E+08	2.80E+08	5.43E-02	1.36E-01	51.6
24	2.58E+08	2.80E+08	5.43E-02	1.36E-01	51.6

Tabel F.10 *Fatigue Life Kondisi Cross-Flow*

Keadaan <i>Cross flow</i>					
Panjang Span Aktual	N	n	Dfat	D fat rpf 105	fatigue life
m	cycle	cycle			years
7	5.31E+02	5.80E+02	5.46E-02	1.37E-01	51.3
11	3.55E+03	3.40E+03	4.79E-02	1.20E-01	58.3
12	6.06E+03	6.20E+03	5.11E-02	1.28E-01	54.8
14	8.07E+03	8.10E+03	5.02E-02	1.25E-01	55.8
15	1.10E+04	1.20E+04	5.46E-02	1.37E-01	51.2
17	1.94E+04	1.90E+04	4.88E-02	1.22E-01	57.3
20	4.18E+04	4.30E+04	5.15E-02	1.29E-01	54.4
21	7.75E+04	6.90E+04	4.45E-02	1.11E-01	62.9
22	6.61E+04	6.80E+04	5.14E-02	1.29E-01	54.5
24	1.49E+05	1.83E+05	6.16E-02	1.54E-01	45.5
24	1.39E+05	1.85E+05	6.68E-02	1.67E-01	41.9

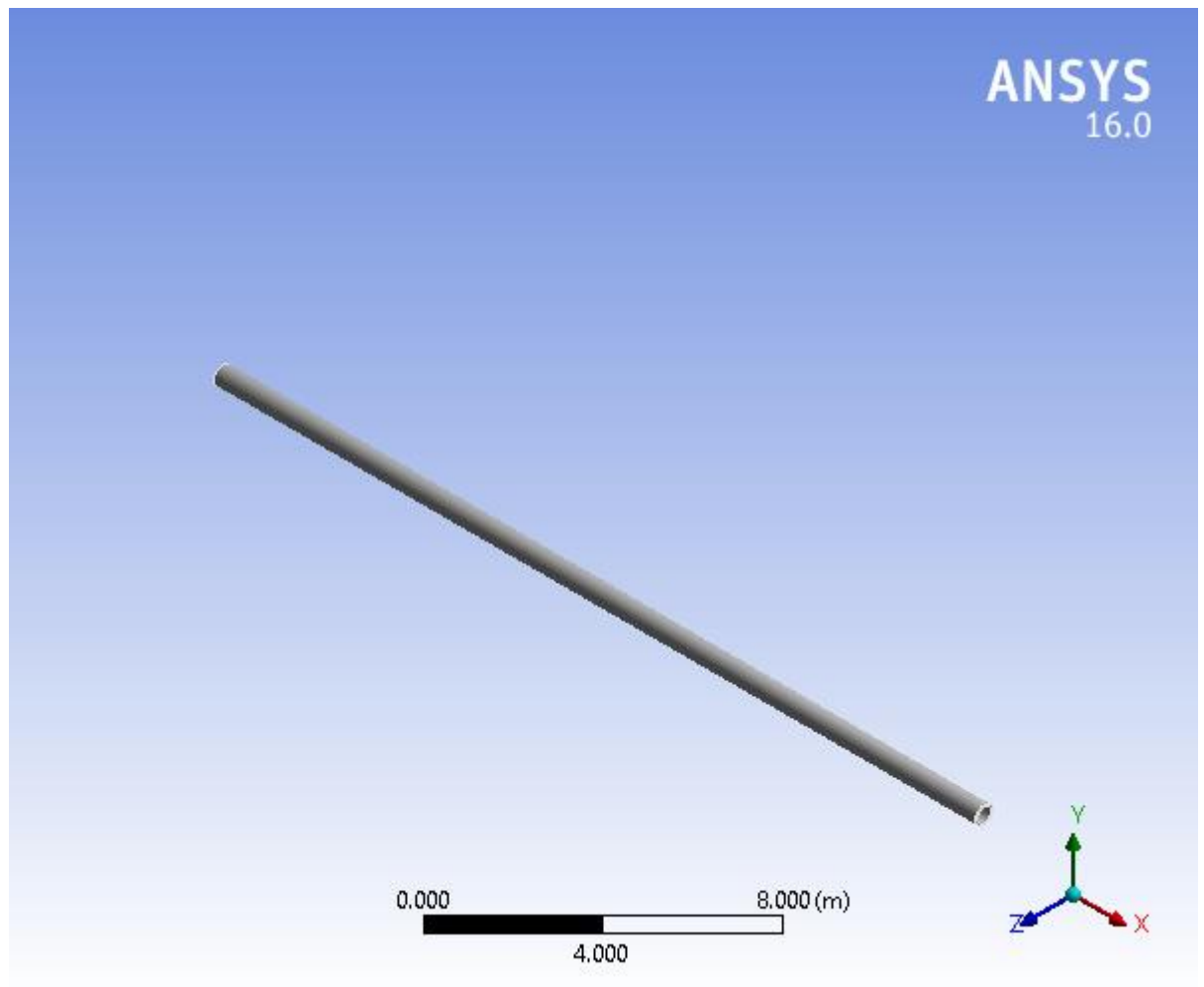
LAMPIRAN G

Output ANSYS Static Structural



Project

First Saved	Wednesday, July 4, 2018
Last Saved	Wednesday, July 4, 2018
Product Version	16.0 Release
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



Contents

- [Units](#)
- [Model \(B4\)](#)
 - [Geometry](#)
 - [Parts](#)
 - [Coordinate Systems](#)
 - [Connections](#)
 - [Contacts](#)
 - [Contact Region](#)
 - [Mesh](#)
 - [Named Selections](#)
 - [Static Structural \(B5\)](#)
 - [Analysis Settings](#)
 - [Loads](#)
 - [Imported Load \(A5\)](#)
 - [Imported Pressure](#)
 - [Solution \(B6\)](#)
 - [Solution Information](#)
 - [Equivalent Stress](#)
- [Material Data](#)
 - [Structural Steel](#)

Units

TABLE 1

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

Model (B4)

Geometry

TABLE 2
Model (B4) > Geometry

Object Name	Geometry
State	Fully Defined
Definition	
Source	G:\118 ATTACK\SIDANG SEKARANG\untuk p3_files\dp0\CFX\DM\CFX.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters
Element Control	Program Controlled
Display Style	Body Color
Bounding Box	

Length X	24. m
Length Y	6. m
Length Z	10. m
Properties	
Volume	2.1664 m ³
Mass	17006 kg
Scale Factor Value	1.
Statistics	
Bodies	2
Active Bodies	1
Nodes	36060
Elements	5620
Mesh Metric	None
Basic Geometry Options	
Parameters	Yes
Parameter Key	DS
Attributes	No
Named Selections	No
Material Properties	No
Advanced Geometry Options	
Use Associativity	Yes
Coordinate Systems	No
Reader Mode Saves Updated File	No
Use Instances	Yes
Smart CAD Update	No
Compare Parts On Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\ASUS\AppData\Roaming\Ansys\v160
Analysis Type	3-D
Decompose Disjoint Geometry	Yes
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

TABLE 3
Model (B4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Solid</i>	<i>Solid</i>
State	Meshed	Suppressed
Graphics Properties		
Visible	Yes	No
Transparency	1	
Definition		

Suppressed	No	Yes
Stiffness Behavior	Flexible	
Coordinate System	Default Coordinate System	
Reference Temperature	By Environment	
Material		
Assignment	Structural Steel	
Nonlinear Effects	Yes	
Thermal Strain Effects	Yes	
Bounding Box		
Length X	24. m	
Length Y	0.5492 m	6. m
Length Z	0.5492 m	10. m
Properties		
Volume	2.1664 m³	1434.3 m³
Mass	17006 kg	1.1259e+007 kg
Centroid X	12. m	
Centroid Y	-2.3398e-005 m	2.4952 m
Centroid Z	-4.1772e-005 m	-2.2292e-008 m
Moment of Inertia Ip1	1030.1 kg·m²	1.2783e+008 kg·m²
Moment of Inertia Ip2	8.1404e+005 kg·m²	6.3466e+008 kg·m²
Moment of Inertia Ip3	8.1404e+005 kg·m²	5.7409e+008 kg·m²
Statistics		
Nodes	36060	0
Elements	5620	0
Mesh Metric	None	

Coordinate Systems

TABLE 4
Model (B4) > Coordinate Systems > Coordinate System

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Cartesian
Coordinate System ID	0.
Origin	
Origin X	0. m
Origin Y	0. m
Origin Z	0. m
Directional Vectors	
X Axis Data	[1. 0. 0.]
Y Axis Data	[0. 1. 0.]
Z Axis Data	[0. 0. 1.]

Connections

TABLE 5
Model (B4) > Connections

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
Auto Detection	
Generate Automatic Connection On Refresh	Yes
Transparency	
Enabled	Yes

TABLE 6
Model (B4) > Connections > Contacts

Object Name	<i>Contacts</i>
State	Suppressed
Definition	
Connection Type	Contact
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Auto Detection	
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0.
Tolerance Value	6.6708e-002 m
Use Range	No
Face/Face	Yes
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies
Statistics	
Connections	1
Active Connections	0

TABLE 7
Model (B4) > Connections > Contacts > Contact Regions

Object Name	<i>Contact Region</i>
State	Suppressed
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	No Selection
Contact Bodies	Solid
Target Bodies	Solid
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic

Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	6.6708e-002 m
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Mesh

TABLE 8
Model (B4) > Mesh

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
Display	
Display Style	Body Color
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	1.35720 m
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Patch Conforming Options	

Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	No
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Straight Sided Elements	No
Number of Retries	Default (4)
Extra Retries For Assembly	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	
Nodes	36060
Elements	5620
Mesh Metric	None

Named Selections

TABLE 9
Model (B4) > Named Selections > Named Selections

Object Name	<i>pipe</i>	<i>selimut</i>	<i>Inlet</i>	<i>outlet</i>	<i>wall</i>
State	Fully Defined		Suppressed		
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	4 Faces	1 Face	No Selection		
Definition					
Send to Solver	Yes				
Visible	Yes				
Program Controlled Inflation	Exclude				
Statistics					
Type	Imported				
Total Selection	4 Faces	1 Face		4 Faces	
Suppressed	0		1		4
Used by Mesh Worksheet	No				

Static Structural (B5)

TABLE 10
Model (B4) > Analysis

Object Name	<i>Static Structural (B5)</i>
State	Solved
Definition	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Static Structural
Solver Target	Mechanical APDL
Options	
Environment Temperature	25. °C
Generate Input Only	No

TABLE 11
Model (B4) > Static Structural (B5) > Analysis Settings

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	Program Controlled
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	Off
Inertia Relief	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points

Analysis Data Management	
Solver Files Directory	G:\118 ATTACK\SIDANG SEKARANG\untuk p3_files\dp0\SYS\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	No
Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

TABLE 12
Model (B4) > Static Structural (B5) > Loads

Object Name	Fixed Support	Drag Force	Axial Force	Submerged Weigt Without Steel	Internal Pressure	External Pressure
State	Fully Defined					
Scope						
Scoping Method	Geometry Selection					
Geometry	2 Faces	1 Face	4 Faces		1 Face	
Definition						
Type	Fixed Support	Force			Pressure	
Suppressed	No					
Define By		Components	Vector	Components	Normal To	
Coordinate System		Global Coordinate System		Global Coordinate System		
X Component		0. N (ramped)		0. N (ramped)		
Y Component		0. N (ramped)		-6583.5 N (ramped)		
Z Component		-8912.4 N (ramped)		0. N (ramped)		
Magnitude			- 9.96e+005 N (ramped)		1.3798e+006 Pa (ramped)	9.05e+005 Pa (ramped)
Direction			Defined			

FIGURE 1
Model (B4) > Static Structural (B5) > Drag Force

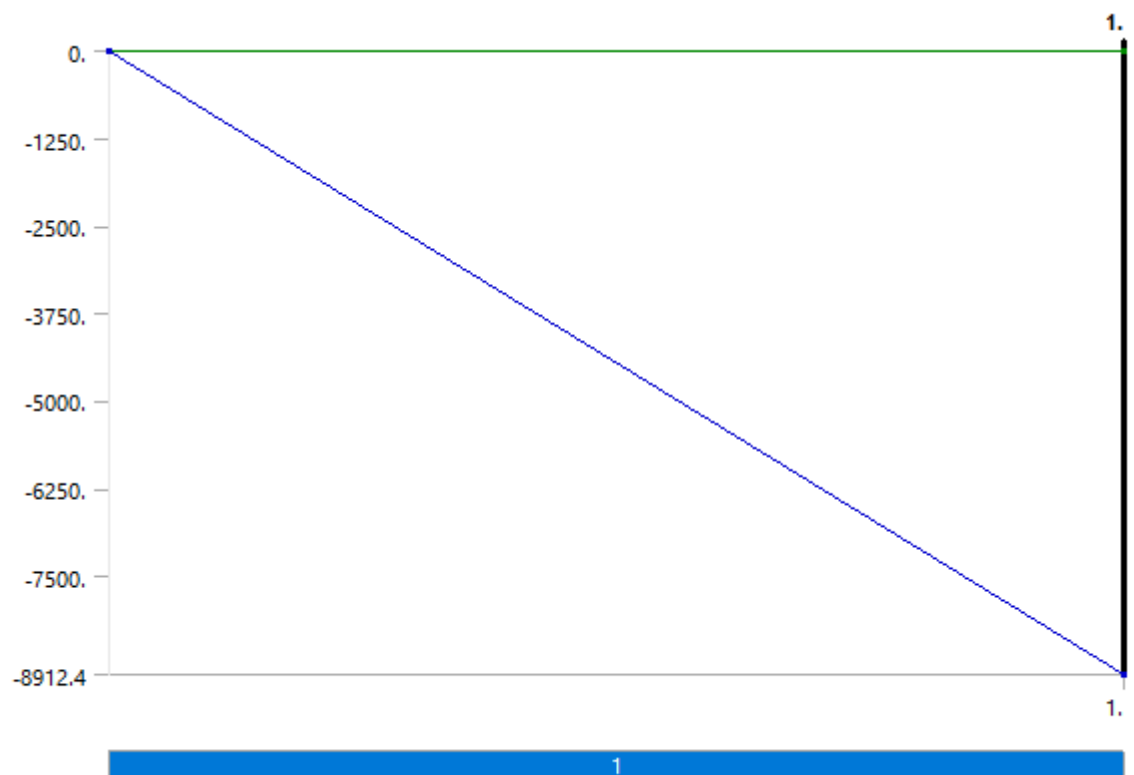


FIGURE 2
Model (B4) > Static Structural (B5) > Axial Force

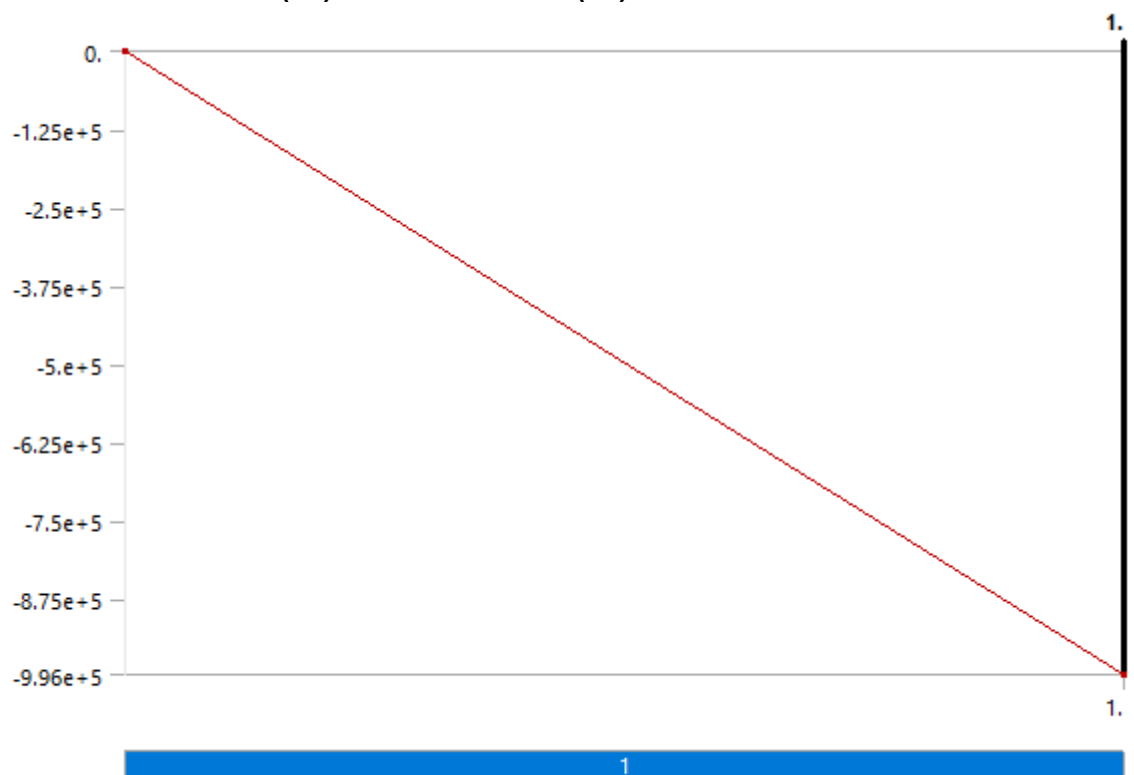


FIGURE 3
Model (B4) > Static Structural (B5) > Submerged Weigt Without Steel

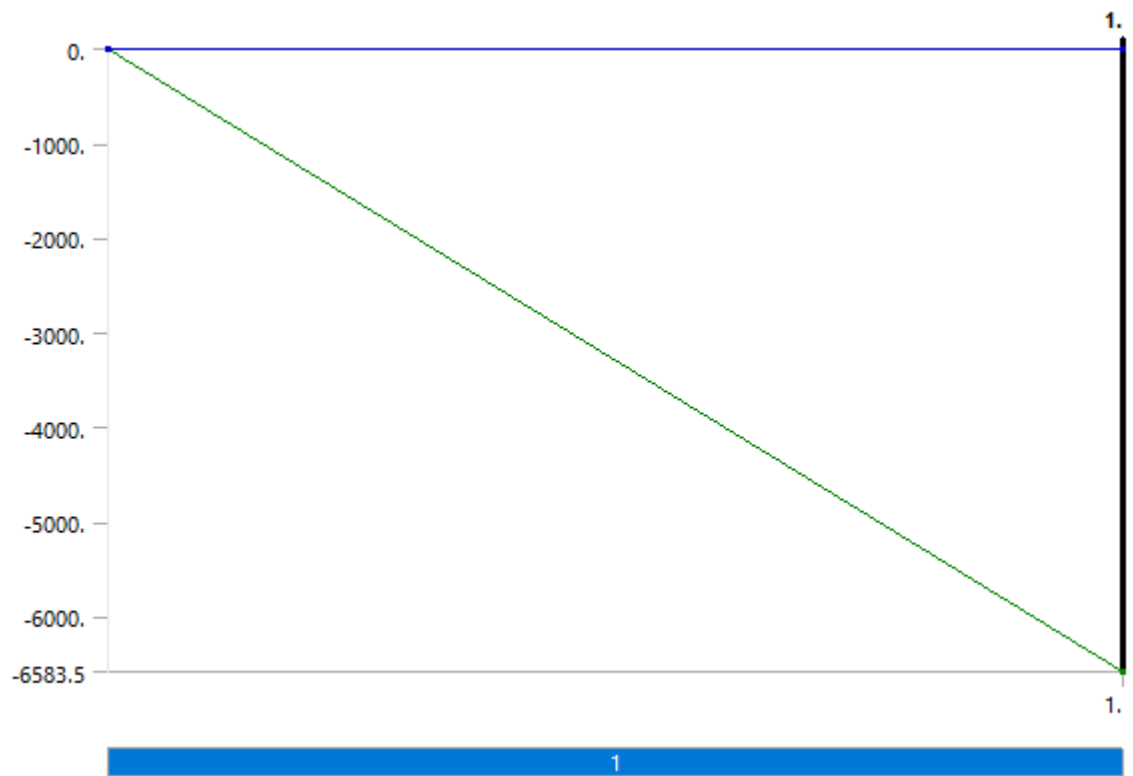


FIGURE 4
Model (B4) > Static Structural (B5) > Internal Pressure

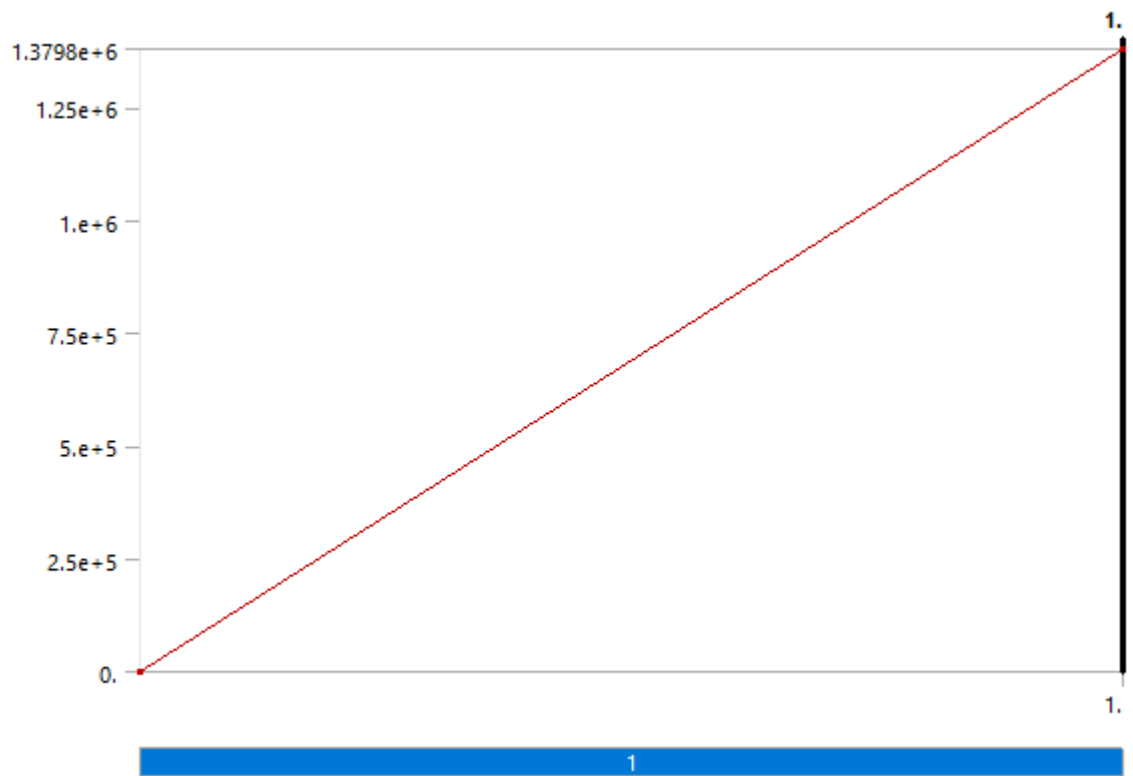


FIGURE 5
Model (B4) > Static Structural (B5) > External Pressure

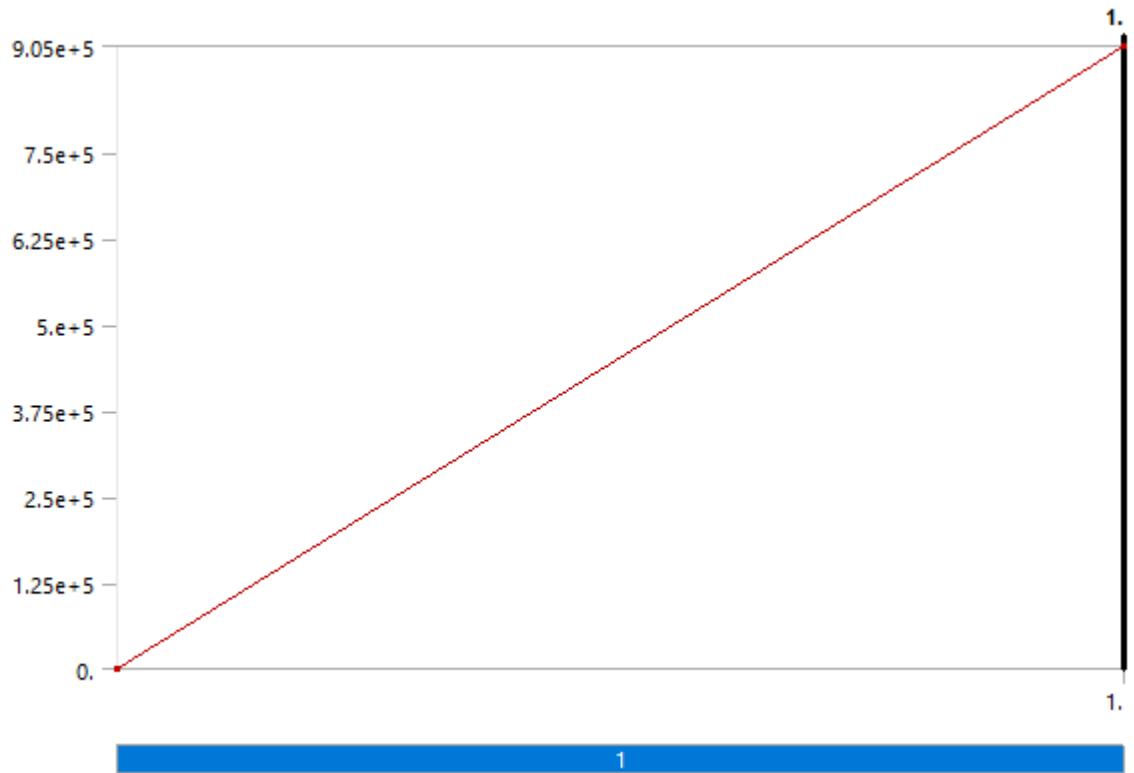


TABLE 13
Model (B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (A5)

Object Name	<i>Imported Load (A5)</i>
State	Fully Defined
Definition	
Type	Imported Data
Interpolation Type	CFD Results Interpolator
Suppressed	No
Source	A5::Solution

TABLE 14
Model (B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (A5) > Imported Pressure

Object Name	<i>Imported Pressure</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
Definition	
Type	Imported Pressure
Tabular Loading	Program Controlled
Suppressed	No

Graphics Controls	
Component	All
Transfer Definition	
CFD Surface	Default Fluid Fluid Interface Side 2
CFD Data	
CFD Results File	G:\118 ATTACK\SIDANG SEKARANG\untuk p3_files\dp0\SYS\MECH\Solution\Fluid Flow CFX_001.res

Model (B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (A5) > Imported Pressure

	Source Time (s)	Source Time Step	Analysis Time (s)	Scale	Offset (Pa)
1	0.	36.	1	1	0

Model (B4) > Static Structural (B5) > Imported Load (A5) > Imported Pressure > Imported Load Transfer Summary

CFD Load Transfer Summary

All values correspond to the CFD results before the application of any Scale or Offset operations set in Mechanical.

CFD Computed Forces from CFD Results File

C:\Users\w10\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-

OKPHRU8_w10_9284_2\unsaved_project_files\dp0\SYS\MECH\Solution\Fluid Flow

CFX_001.res

X-component = 8.3896e-005 N

Y-component = 1.2883 N

Z-component = 9.8734 N

Mechanical Mapped Forces for Mechanical Surface File

C:\Users\w10\AppData\Local\Temp\WB_DESKTOP-

OKPHRU8_w10_9284_2\unsaved_project_files\dp0\SYS\MECH\Import_ANSYS_61.cd

b

X-component = 8.406e-005 N

Y-component = 1.2791 N

Z-component = 9.8824 N

100% of Mechanical nodes were mapped to the CFD surface.

Solution (B6)

TABLE 15
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution

Object Name	<i>Solution (B6)</i>
State	Solved
Adaptive Mesh Refinement	
Max Refinement Loops	1.

Refinement Depth	2.
Information	
Status	Done
Post Processing	
Calculate Beam Section Results	No

TABLE 16
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Solution Information

Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
Solution Information	
Solution Output	Solver Output
Newton-Raphson Residuals	0
Update Interval	2.5 s
Display Points	All
FE Connection Visibility	
Activate Visibility	Yes
Display	All FE Connectors
Draw Connections Attached To	All Nodes
Line Color	Connection Type
Visible on Results	No
Line Thickness	Single
Display Type	Lines

TABLE 17
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Results

Object Name	<i>Equivalent Stress</i>
State	Solved
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Equivalent (von-Mises) Stress
By	Time
Display Time	Last
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
Minimum	1.2361e+006 Pa
Maximum	2.0113e+008 Pa
Information	

Time	1. s
Load Step	1
Substep	1
Iteration Number	1

FIGURE 6
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

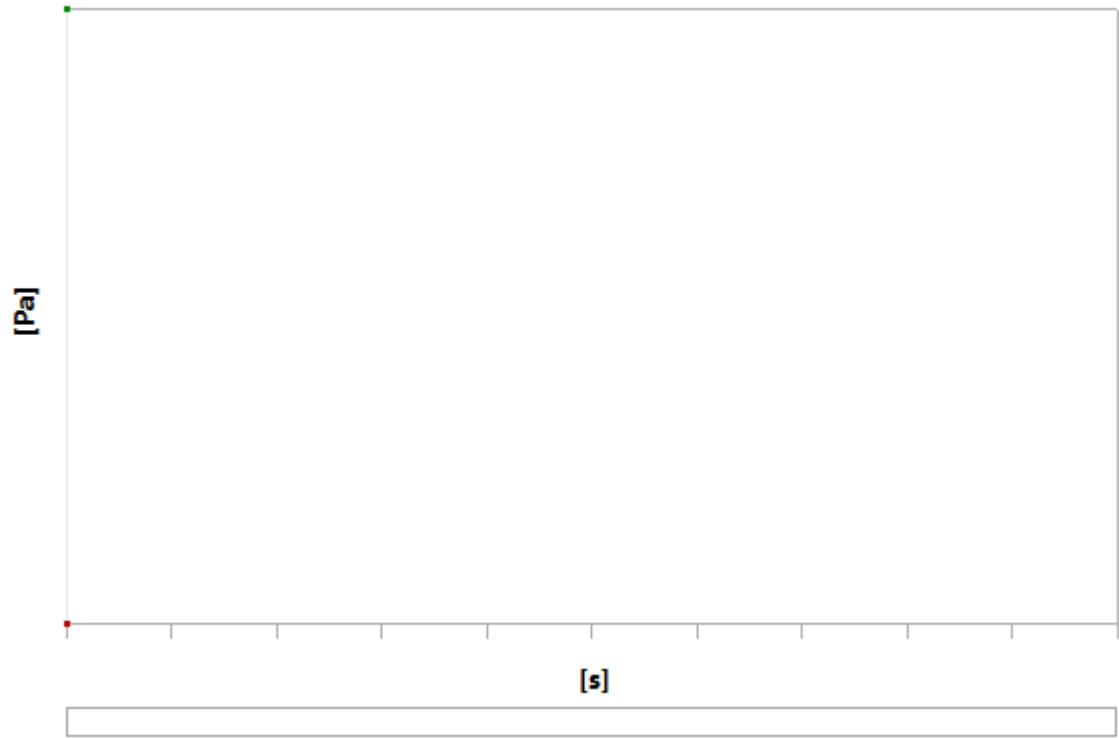


TABLE 18
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
1.	1.2361e+006	2.0113e+008

Material Data

Structural Steel

TABLE 19
Structural Steel > Constants

Density	7850 kg m ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	1.17e-005 C ⁻¹
Specific Heat	434 J kg ⁻¹ C ⁻¹
Thermal Conductivity	60.5 W m ⁻¹ C ⁻¹
Resistivity	1.7e-007 ohm m

TABLE 20
Structural Steel > Compressive Ultimate Strength

Compressive Ultimate Strength Pa
0

TABLE 21
Structural Steel > Compressive Yield Strength

Compressive Yield Strength Pa
2.5e+008

TABLE 22
Structural Steel > Tensile Yield Strength

Tensile Yield Strength Pa
2.5e+008

TABLE 23
Structural Steel > Tensile Ultimate Strength

Tensile Ultimate Strength Pa
4.6e+008

TABLE 24
Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion

Reference Temperature C
22

TABLE 25
Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress

Alternating Stress Pa	Cycles	Mean Stress Pa
3.999e+009	10	0
2.827e+009	20	0
1.896e+009	50	0
1.413e+009	100	0
1.069e+009	200	0
4.41e+008	2000	0
2.62e+008	10000	0
2.14e+008	20000	0
1.38e+008	1.e+005	0
1.14e+008	2.e+005	0
8.62e+007	1.e+006	0

TABLE 26
Structural Steel > Strain-Life Parameters

Strength Coefficient Pa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient Pa	Cyclic Strain Hardening Exponent
9.2e+008	-0.106	0.213	-0.47	1.e+009	0.2

TABLE 27
Structural Steel > Isotropic Elasticity

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2.07e+011	0.3	1.725e+011	7.9615e+010

TABLE 28
Structural Steel > Isotropic Relative Permeability

Relative Permeability
10000

BIODATA PENULIS



Fauzan Adhitya Pratama lahir di Metro pada tanggal 17 Januari 1998. Penulis menjalani pendidikan formal SD selama 5 tahun di SD Bina Insani Bogor, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 4 Bogor dan SMA Negeri 5 Bogor. Setelah lulus pada tahun 2014, penulis mengikuti Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan sebagai Staff Departemen Hubungan Luar periode 2015 – 2016 dan diberikan amanah lebih untuk menjadi Kepala Departemen Hubungan Luar HIMATEKLA pada periode 2016 – 2017. Selain aktif di dalam Himpunan, penulis juga aktif menjadi panitia dari kegiatan yang ada di dalam atau luar kampus. Penulis juga diberi kesempatan untuk menyelesaikan Kerja Praktek di PT. Pertamina Hulu Energi West Madura Offshore (PHE WMO) pada bulan Juni – Agustus 2017, penulis ditempatkan di Departemen Facility Engineering and Integrity (FEI) untuk menganalisis *freespan* yang terjadi pada pipa MOL-AW 10” milik PT. PHE WMO.

Kontak penulis :

Email : fauzanadhityap@gmail.com